

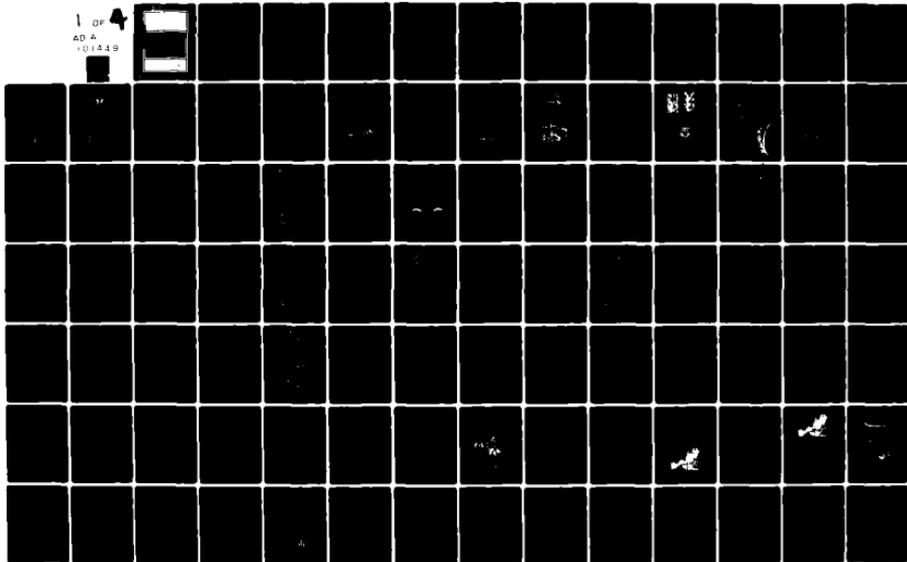
AD-A101 449

ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT--ETC F/G 6/5
PHYSIOPATHOLOGIE ET PATHOLOGIE DES AFFECTIONS DU RACHIS EN MEDE--ETC(U)
APR 81 R DELAHAYE, R AUFFRET, P DOURY
AGARD-AG-250 (FR)

NL

UNCLASSIFIED

1 OF 4
AD A
101449



LEVEL ~~II~~

①

AGARD-AG-250 (FR)

AGARD-AG-250 (FR)

AGARD

GRUPE CONSULTATIF POUR LA RECHERCHE
ET LE DEVELOPPEMENT AEROSPATIAL

7 RUE ANCELLE 92200 NEUILLY SUR SEINE FRANCE

AD A101449

AGARDographie No. 250 (FR)

Physiopathologie et Pathologie des Affections du Rachis en Médecine Aérospatiale

This document has been approved
for public release and sale; its
distribution is unlimited.



A

ORGANISATION DU TRAITE DE L'ATLANTIQUE NORD



DTC FILE COPY

VOIR COUVERTURE DE DOS POUR
DIFFUSION ET DISPONIBILITE DE CE DOCUMENT

81 7 14 136

Roland-Paul /Delahaye
Robert /Auffret
Paul /Doury
Christian /Kleitz
Alain /Leger

14.
AGARD-AG-250 (FR)

ORGANISATION DU TRAITE DE L'ATLANTIQUE NORD

GROUPE CONSULTATIF POUR LA RECHERCHE ET LE DEVELOPPEMENT AEROSPATIAL

(NORTH ATLANTIC TREATY ORGANISATION)

(Physiopathology and Pathology of
Affections of the Spine in
Aerospace Medicine)

AGARDographie No.250 (FR)

**PHYSIOPATHOLOGIE ET PATHOLOGIE DES AFFECTIONS
DU RACHIS EN MEDECINE AEROSPATIALE**

(2ème Edition)

Sous la direction de
R.P.Delahaye et R.Auffret

Avec la collaboration de
P.Doury, C.Kleitz, A.Leger, G.Leguay,
P.J.Metges, J.L.Poirier, B.Vettes, H.Vieillefond

- Hôpital d'Instruction des Armées Dominique Larrey à Versailles -- 78013
- Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vol à Brétigny Air -- 91220
- Ecole d'Application du Service de Santé pour l'Armée de l'Air -- 75996 Paris/Armées
- Hôpital d'Instruction des Armées Bégin à Saint Mande -- 94160

DISTRIBUTION STATEMENT A

Approved for public release;
Distribution Unlimited

Accession For	
DTIC	SEARCH
ERIC	TAB
Unannounced	
Justification per <i>the</i>	
<i>on file</i>	
By	
Distribution/	
Availability Codes	
Avail and/or	
Dist	Special
<i>A</i>	

Cet ouvrage est publié sous l'égide du Groupe de Médecine Aérospatiale de l'AGARD.

440 043

LA MISSION DE L'AGARD

La mission de l'AGARD est de réunir les personnalités marquantes des pays de l'OTAN dans les domaines de la science et de la technologie intéressant les activités aérospatiales, en vue:

- d'échanger des renseignements scientifiques et techniques;
- de stimuler de façon continue les progrès des sciences aérospatiales pouvant permettre de renforcer la défense commune;
- d'améliorer la coopération entre les pays membres dans le domaine de la recherche et du développement aérospatiaux;
- de fournir au Comité Militaire de l'Atlantique Nord une aide et des avis scientifiques et techniques dans le domaine de la recherche et du développement aérospatiaux;
- d'apporter, sur demande, aux autres organismes de l'OTAN et aux pays membres, une aide scientifique et technique en ce qui concerne les problèmes de recherche et de développement dans le domaine aérospatial;
- de fournir une aide aux pays membres en vue d'accroître leur potentiel scientifique et technique;
- de recommander aux pays membres des méthodes efficaces pour utiliser leurs possibilités en matière de recherche et de développement au profit de l'ensemble de la communauté de l'OTAN.

Le Conseil des Délégués Nationaux de l'AGARD constitue la plus haute autorité au sein de cet organisme; il est composé de représentants éminents de chaque pays membre, faisant l'objet d'une nomination officielle. Pour mener à bien sa mission, l'AGARD dispose de Groupes de Travail composés d'experts désignés par les Délégués Nationaux, d'un Programme d'Echanges et de Consultants, et d'un Programme d'Etudes en vue d'Applications Aérospatiales. L'AGARD rend compte des résultats de ses travaux aux pays membres et aux Autorités de l'OTAN sous forme de publications dont cet ouvrage est un exemple.

Seules sont admises à participer aux activités de l'AGARD les personnes ayant fait l'objet d'une invitation et jouissant en règle générale de la citoyenneté d'un des pays de l'OTAN.

La texte de cette publication a été directement reproduit
à partir d'un exemplaire fourni par l'AGARD ou par les auteurs.

Publiée en avril 1981

Copyright © AGARD 1981

Tous droits réservés

ISBN 92-835-2108-0



Imprimé par Technical Editing and Reproduction Ltd
Harford House, 7-9 Charlotte St, London, W1P 1HD

∟ ISTE DES AUTEURS

- **DELAHAYE Roland**
 Médecin Chef des Services
 Professeur Agrégé du Service de Santé des Armées, Ancien titulaire de la
 Chaire d'Electroradiologie et de Biophysique appliquées à l'Aéronautique
 de l'Ecole d'Application du Service de Santé pour l'Armée de l'Air à Paris,
 ancien Chef du Service de Radiologie des Hôpitaux d'Instruction des Armées
 Dominique Larrey à Versailles et Bégin à Saint Mandé.
 Médecin Chef de l'Hôpital d'Instruction des Armées Dominique Larrey
 78013 VERSAILLES.
 (Contribution aux chapitres 1, 2, 3, 5-1, 5-2, 5-3, 5-5, 5-6, 6-1, 6-2, 7 et 8).
- **AUFFRET Robert**
 Médecin en Chef
 Pilote de l'Armée de l'Air, Spécialiste de Recherche du Service de Santé
 des Armées, Maître de Recherches du Service de Santé des Armées.
 Membre du Conseil Médical de l'Aviation Civile (Ministère des Transports)
 Médecin Chef du Laboratoire de Médecine Aérospatiale et du Centre d'Essais
 en vel de Brétigny sur Orge.
 (Contribution aux chapitres 1, 4, 5-3, 6-1, 6-2, 7 et 8).
- **DOURY Paul**
 Médecin Chef des Services
 Médecin des Hôpitaux des Armées
 Professeur Agrégé du Val de Grâce, titulaire de la Chaire d'Hygiène et
 d'Ergonomie de l'Ecole d'Application du Service de Santé pour l'Armée de
 Terre, Chef de la Clinique de Rhumatologie de l'Hôpital d'Instruction des
 Armées Bégin à Saint Mandé.
 (Contribution aux chapitres 5-4, 7 et 8)
- **KLEITZ Christian**
 Médecin Principal
 Electroradiologiste des Hôpitaux des Armées, adjoint au Chef de Service
 de Radiologie de l'Hôpital d'Instruction des Armées Bégin à Saint Mandé.
 (Contribution aux chapitres 2, 3 et 7).
- **LEGER Alain**
 Médecin Principal
 Assistant de Recherche du Service de Santé des Armées.
 Breveté Parachutiste.
 Membre du Conseil Médical de la Fédération Française de Parachutisme.
 Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vel de Brétigny
 sur Orge.
 (Contribution au chapitre 5-3)

- **LEGUAY Gérard**
 Médecin en Chef
 Médecin des Hôpitaux des Armées
 Professeur Agrégé du Service de Santé des Armées, titulaire de la Chaire de Médecine Aéronautique de l'Ecole d'Application du Service de Santé pour l'Armée de l'Air à Paris et Chef du Service de Médecine Aéronautique de l'Hôpital d'Instruction des Armées Dominique Larrey à Versailles.
 (Contribution aux chapitres 5-4 et 7).

- **METGES Pierre Jean**
 Médecin en Chef
 Electroradiologiste des Hôpitaux des Armées
 Professeur Agrégé du Service de Santé des Armées, attaché à la Chaire d'Electroradiologie et de Biophysique appliquées à l'Aéronautique de l'Ecole d'Application du Service de Santé pour l'Armée de l'Air à Paris
 Chef du Service de Radiologie de l'Hôpital d'Instruction des Armées Bégin à Saint Mandé 94160.
 (Contribution aux chapitres 5-2, 5-5, 5-6, 6-1 et 7).

- **POIRIER Jean-Louis**
 Médecin Principal
 Spécialiste de Recherche du Service de Santé des Armées
 Chef de la Division Vibrations du Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vol de Brétigny sur Orge.
 (Contribution au chapitre 6-1).

- **VETTES Bernard**
 Médecin en Chef
 Spécialiste de Médecine Aéronautique
 Chef de la Division Accélération du Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vol de Brétigny sur Orge.
 (Contribution aux chapitres 5-3 et 6-1).

- **VIELLEFOND Henri**
 Médecin en Chef
 Spécialiste de Recherche du Service de Santé des Armées
 Professeur Agrégé du Service de Santé des Armées, attaché à la Chaire de Physiologie et d'Ergonomie aérospatiales de l'Ecole d'Application du Service de Santé pour l'Armée de l'Air à Paris.
 Médecin Chef adjoint du Laboratoire de Médecine Aérospatiale et du Centre d'Essais en Vol de Brétigny sur Orge.
 (Contribution au chapitre 4)

S O M M A I R E

Liste des Auteurs	3
Chapitre 1 : - Introduction : Importance des affections du rachis en Médecine Aérospatiale.....	7
Chapitre 2 : - Anatomie du rachis	9
2.1. Embryologie rachidienne	11
2.2. Caractères généraux des vertèbres	11
2.3. Caractères particuliers des vertèbres	11
2.4. Moyens d'union	15
2.5. Le rachis dans son ensemble	25
2.6. Le rachis en position assise	27
Chapitre 3 : - Biomécanique du rachis	29
3.1. Biomécanique du disque intervertébral	31
3.2. Biomécanique des ligaments intervertébraux	40
3.3. Biomécanique de la vertèbre	40
3.4. Biomécanique de la colonne vertébrale	43
3.5. Rôle de la cage thoracique et de la musculature..	45
Chapitre 4 : - Les facteurs d'agression en vol pour le rachis	47
4.1. Les facteurs inhérents au vol	47
4.2. Les facteurs accidentels	51
Chapitre 5 : - Les lésions traumatiques du rachis en médecine Aéronautique	55
5.1. Introduction	57
5.2. Théories pathogéniques des fractures du rachis	57
5.3. Etiopathogénie	59
5.3.1. Le crash	59
5.3.2. Les accidents d'hélicoptère	66
. Les différentes catégories d'accidents	69
. Physiopathogénie des lésions vertébrales	71
5.3.3. Ejection des pilotes d'avions de combat,..	73
. Historique	74
. Principe du siège	74
. Description des différentes phases de l'éjection	77
. Différents types d'éjection	82
. Résultats des éjections	83
. Répartition des lésions de l'éjection...	84
. Mécanisme physiopathogénique des fractures du rachis	88
5.3.4. Le parachutisme	98
5.3.4.1. Le parachutisme moyen de transport	104
5.3.4.2. Le parachutisme sportif	111
5.3.4.3. Le vol libre	121
5.3.4.4. Limites humaines de tolérance aux impacts en chute libre	121
5.3.5. Les fractures du rachis en vol	127
5.3.5.1. Les pompages	127
5.3.5.2. Les déverrouillages de siège	131
5.3.6. Accidents de centrifugeuse et d'expéri- mentation	132
5.4. Examen clinique	136
. Examen clinique du rachis	136
. Examen clinique des traumatisés du rachis	137
5.5. Radiologie des traumatismes du rachis en médecine aéronautique	139
5.5.1. Technique radiologique	140
5.5.2. Séméiologie radiologique	143
. L'instabilité vertébrale	143
. Séméiologie des lésions osseuses et ligamentaires	146
. L'arc postérieur	161
5.5.3. Classification des fractures du rachis ...	170
5.5.4. Etude radiologique des fractures du rachis dorso-lombaire	174
5.5.5. Etude radiologique des fractures du rachis cervical (C3.C7)	186
5.5.6. Etude radiologique des fractures de C1 et de C2	198

5.6. Séquelles des fractures et des traumatismes vertébraux	210
5.6.1. Principes thérapeutiques	211
5.6.2. Etude clinique des séquelles de traumatismes du rachis	211
5.6.3. Evolution anatomopathologique du foyer de fracture	213
5.6.4. Les aspects radiologiques des séquelles	214
5.6.5. Séquelles des lésions ligamentaires	222
Chapitre 6 : - Les affections de posture en médecine aérospatiale ...	223
6.1. Les douleurs vertébrales des pilotes d'hélicoptères	224
6.1.1. Introduction	225
6.1.2. Etude clinique	225
6.1.3. Etude radiologique	227
6.1.4. Evolution	228
6.1.5. Physiopathogénie	229
6.1.5.1. Le facteur postural	229
6.1.5.2. Les vibrations	234
6.1.6. Echelle d'appréciation du niveau vibratoire d'un hélicoptère	242
6.1.7. Résultats des mesures de vibrations des hélicoptères	245
6.1.8. Expérimentations avec des coussins de siège	248
6.1.9. Moyens de protection	248
6.2. La colonne cervicale des pilotes d'avions de combat	260
Chapitre 7 : - Aptitude au personnel navigant et rachis	263
7.1. Admission au personnel navigant	264
7.1.1. Examen clinique	264
7.1.2. Examen radiologique d'aptitude... ..	264
7.1.3. Les troubles statiques du rachis	266
7.1.4. Les séquelles d'épiphysose vertébrale (Maladie de Scheuermann)	271
7.1.5. Les anomalies congénitales du rachis	275
7.1.6. Les affections acquises	278
7.1.7. Les causes d'inaptitude déterminées par l'expertise clinique et radiologique	278
7.1.8. Conclusion	281
Annexes au paragraphe 7.1.	282
7.2. Visites révisionnelles	286
7.2.1. Les fractures et les traumatismes du rachis	286
7.2.2. Les ostéoarthrites vertébrales... ..	287
7.2.3. Arthrose vertébrale	288
7.2.4. Spondylarthrite ankylosante	294
7.2.5. Interventions chirurgicales	298
7.2.6. Le problème de la répétition des éjections	298
Chapitre 8 : - Aspects médico-légaux des affections rachidiennes en Médecine Aéronautique	299
8.1. Traumatismes et arthrose intervertébrale	300
8.1.1. Traumatisme vertébral sans fracture	300
8.1.2. Traumatisme vertébral et fracture	301
8.2. Traumatismes et rhumatismes inflammatoires	302
8.3. Spondylolisthésis et traumatisme	302
Conclusion	306
Liste des Illustrations	307
Bibliographie - Références Médecine Aéronautique	314
Bibliographie - Références rachidiennes	314
Index des matières	332

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Importance des affections du rachis en Médecine Aérospatiale

Dans l'introduction de l'AGARDOGRAPH A.G. 140.70 " Physiopathology and Pathology of Affections of the Spine in Aerospace Medicine " (1970) (52), nous remarquons que le Médecin de l'aéronautique était confronté quotidiennement avec la pathologie vertébrale du personnel navigant. De plus, les opinions les plus contradictoires rencontrées dans les nombreuses publications médicales ou techniques ne facilitent pas la tâche du clinicien. En effet, ce dernier peut consulter de multiples travaux de recherche et peu d'articles ou de revues consacrés aux aspects cliniques des affections vertébrales de l'aviateur et précisant la conduite à tenir (52) (97).

Qu'en est-il en 1980 ? La fréquence des douleurs rachidiennes (96) (177), de la traumatologie vertébrale n'a pas diminué. Certaines formes cliniques nouvelles sont individualisées : fractures en vol des pilotes d'avions de combat créés par des phénomènes vibratoires rapides qui restent rares, atteintes rachidiennes des parachutistes évoluant en vol relatif. D'autres affections, malgré le perfectionnement des systèmes, restent préoccupantes par leur fréquence et leur gravité : fractures dorso-lombaires après éjection de pilotes d'avions de combat, douleurs vertébrales des pilotes d'hélicoptère.

Les cliniciens, sans nul doute, par leurs études épidémiologiques, cliniques, radiologiques, ont contribué à une meilleure connaissance des affections vertébrales en médecine aérospatiale. Malheureusement, semble-t-il, il n'en a pas toujours été de même dans la recherche fondamentale ou appliquée. Plus particulièrement, les essais de mise au point des modèles mathématiques de la colonne vertébrale, malgré d'importants investissements financiers ont peu appris aux médecins, cliniciens. Cette carence, ces échecs ne sauraient les étonner, étant données les imprécisions existant encore de nos jours dans la connaissance élémentaire ou globale de la physiologie et de la biodynamique rachidiennes.

Nous ne prétendons pas affirmer que ces études furent, sont ou seront inutiles. En se basant sur l'analyse absolument nécessaire du rapport coût/efficacité, le doute nous paraît légitime. Détachées de leur contexte clinique et radiologique, de leur finalité pratique (prophylaxie des atteintes traumatiques du rachis, facilitation d'une thérapeutique plus ou moins rationnelle par exemple), ces études théoriques, très peu pratiques, possèdent, dans le milieu praticien, peu de crédit.

Ces remarques basées sur l'expérience justifient si besoin en était - l'obligation du travail en équipe réunissant cliniciens, radiologistes, chirurgiens, spécialistes des Centres de Médecine Aéronautique (Médecins, Pilotes, Ingénieurs).

Dans la rédaction de cet ouvrage dirigé par Roland Paul DELAHAYE et Robert AUFFRET, nous faisons appel à une équipe comprenant des Médecins et des Techniciens des Hôpitaux " Dominique LARREY à 78013 VERSAILLES et BEGIN à 94160 St MANDE, du Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vol de BRETIGNY sur ORGE et de l'Ecole d'Application du Service de Santé pour l'Armée de l'Air (Militar Aeromedical School). Depuis 20 ans, habitués au travail en commun, ce groupe aéromédical a suivi cliniquement et traité de nombreux pilotes atteints d'affections vertébrales, les a examinés en vue de préciser leur aptitude ou de déterminer le taux d'indemnisation. Ces surexpertises avaient été prescrites par le Centre Principal d'Expertise Médicale du Personnel Navigant de l'Aéronautique de PARIS ou par le Secrétariat Général de l'Aviation Civile (Ministère des Transports).

Le Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vol évalue et donne un avis après des essais faisant appel aux techniques les plus élaborées, sur tout nouveau matériel mis en service. Des commissions réunissant Pilotes, Cliniciens, Chercheurs, étudient systématiquement tous les accidents, à la demande des Organismes Officiels.

Cet Agarograph ne peut pas être une étude exhaustive de toutes les affections de la colonne vertébrale en Médecine Aéronautique. Il s'agit plutôt d'un guide qui fera appel à la fois à l'expérience de la clinique, d'expertise, aux résultats des recherches appliquées de l'équipe rédactionnelle et aux données fournies par l'analyse détaillée de la littérature aéromédicale.

Nous voudrions remercier l'AEROSPACE MEDICAL PANEL, son Président, le Comité de Publications, de nous avoir renouvelé leur confiance pour rédiger ce manuel qui devrait rendre service à la fois au médecin et au pilote.

Nous sommes conscients de l'honneur de cette désignation qui se base essentiellement sur la valeur reconnue des travaux présentés aux différentes sessions scientifiques des meetings de l'A.M.P. et des recherches entreprises dans nos formations hospitalières et les laboratoires militaires français.

Dans les premiers chapitres, nous rappellerons les données fondamentales sur l'anatomie et la physiologie de la colonne vertébrale en insistant sur les données

biodynamiques actuellement admises. Nous analyserons les facteurs d'agression du vol pour le rachis. Les premiers chapitres nous paraissent nécessaires à la compréhension des différentes variétés cliniques des affections vertébrales en médecine aéronautique.

Ce livre comprendra 3 parties d'importance très inégale.

Les atteintes traumatiques par leur fréquence, leurs variétés étiologiques, leur symptomatologie, leur évolution méritent une étude très précise.

Les affections de posture de mécanisme physio-pathogénique inconnu retiendront notre attention car ces problèmes nouveaux ne sont pas encore complètement élucidés.

Les maladies acquises du rachis surtout chez les pilotes âgés, méritent d'être étudiées car leur fréquence ne diminue pas.

Il apparaît nécessaire de traiter du problème fondamental de la conduite à tenir en présence d'une affection vertébrale acquise ou non, traumatisme ou inflammatoire, à deux moments caractéristiques de la vie d'un pilote : lors de la visite d'admission et lors des contrôles d'aptitude au fur et à mesure du déroulement de la carrière aéronautique.

Les affections de la colonne vertébrale posent des problèmes médico-légaux souvent très difficiles à résoudre : l'arthrose est-elle post traumatique ? Le rhumatisme infectieux (spondylarthrite ankylosante ou polyarthrite rhumatoïde) a-t-il une relation avec le traumatisme violent d'un accident ou les micro traumatismes ? Le spondylolisthésis découvert au cours d'une carrière pose deux problèmes : cette lésion est-elle susceptible d'être en rapport avec le travail aérien ou un traumatisme aéronautique. Cette lésion connue au début de la carrière du personnel navigant est-elle susceptible d'évoluer ?

Nous donnerons la bibliographie des différents travaux consultés pour la rédaction de ce travail. Nous y trouverons beaucoup de références européennes dont l'originalité et l'antériorité sont indéniables. Les recherches récentes sur le sujet sont plus nombreuses dans les pays anglo-saxons. Les références bibliographiques comprennent d'une part, celles consacrées aux affections vertébrales en médecine aéronautique et d'autre part, celles intéressant uniquement les travaux consacrés à l'étude du rachis.

Roland Paul DELAHAYE

Robert AUFFRET

30 Juillet 1980

CHAPITRE 2 : ANATOMIE DU RACHIS

C. KLEITZ et R.P. DELAHAYE

S O M M A I R E

- 2.1. EMBRYOLOGIE RACHIDIENNE
- 2.2. CARACTERES GENERAUX DES VERTEBRES
 - 2.2.1. Le corps vertébral
 - 2.2.2. L'arc postérieur
- 2.3. CARACTERES PARTICULIERS REGIONAUX DES VERTEBRES
 - 2.3.1. Les vertèbres cervicales
 - 2.3.2. Les vertèbres dorsales
 - 2.3.3. Les vertèbres lombaires
 - 2.3.4. Le sacrum et le coccyx
- 2.4. LES MOYENS D'UNION
 - 2.4.1. Les moyens d'union antérieure
 - 2.4.1.1. Le disque intervertébral
 - 2.4.1.2. Les ligaments périphériques
 - 2.4.2. Les moyens d'union postérieure
 - 2.4.2.1. Les articulations des apophyses articulaires
 - 2.4.2.2. Les ligaments
 - 2.4.3. Les moyens d'union des extrémités du rachis.
- 2.5. LE RACHIS DANS SON ENSEMBLE
 - 2.5.1. Dans le plan sagittal
 - 2.5.2. Dans le plan frontal
- 2.6. LE RACHIS EN POSITION ASSISE.

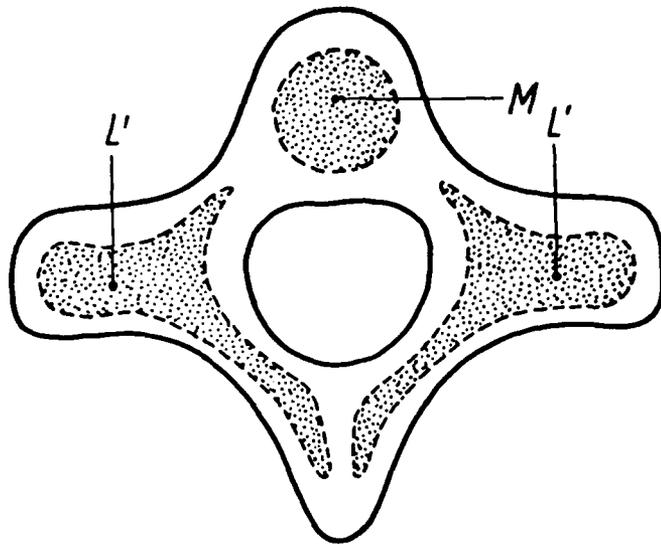


Figure 1 : Vertèbre de fœtus au moment où commence l'ossification de la pièce cartilagineuse (d'après L. TESTUT) (442), M point médian pour le corps, L' points latéraux.

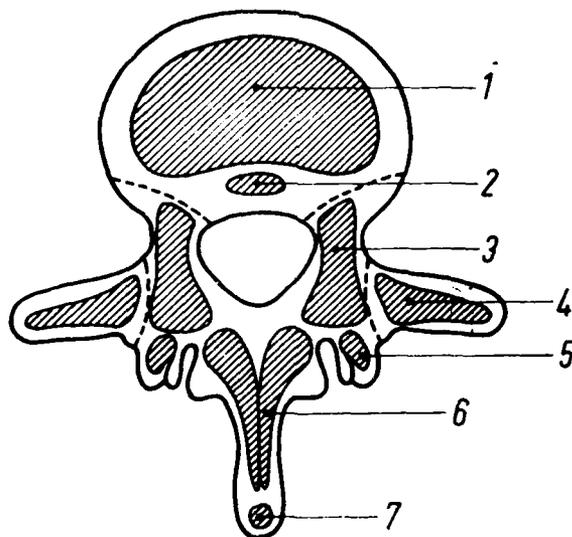


Figure 2 : Ossification et développement d'une vertèbre lombaire vue de face (d'après R. PATURET)

- | | |
|---------------------------------------|----------------------------|
| 1) Centre primitif du corps vertébral | 2) Centre accessoire |
| 3) Point neural antérieur | 4) Point costiforme |
| 5) Point transversaire | 6) Point neural postérieur |
| 7) Point secondaire épineux | |

La colonne vertébrale est une longue tige osseuse résistante et flexible, située à la partie médiane et postérieure du tronc. Elle s'étend de la tête qu'elle soutient au bassin qui la supporte. Elle engaine et protège la moëlle épinière contenue dans le canal rachidien.

Cette colonne est fragmentée en éléments osseux : les vertèbres qui sont articulées les unes aux autres. Le rachis décrit un certain nombre de courbures. De ce fait, il possède des propriétés de soutien du tronc, d'amortisseur et de mobilité associée à une certaine stabilité.

Le rachis se compose de 24 vertèbres présacrées (7 cervicales, 12 dorsales ou thoraciques, 5 lombaires), du sacrum et du coccyx.

2.1. EMBRYOLOGIE RACHIDIENNE (307) (326) (416) (442).

Chez l'embryon apparaît une colonne vertébrale membraneuse axée autour de la notochorde. Lui succède dans le temps une colonne cartilagineuse formée de protovertèbres à disjonction métamérique. A ce stade cartilagineux fait suite un stade d'ossification par l'intermédiaire des noyaux primitifs et secondaires (Fig.1).

Les noyaux primitifs comprennent un centre primitif antérieur et deux points latéraux pour les arcs neuraxiaux qui vont donner des prolongements pour former les apophyses articulaires, les transverses et les lames. Ils apparaissent vers le milieu du 3ème mois de la vie intra utérine.

Les noyaux secondaires apparaissent vers la 8ème année sous la forme d'un anneau marginal supérieur et inférieur pour chaque corps vertébral (Fig 2 et 3). Ce sont les listels marginaux qui se fusionnent avec le corps vers 14.15 ans.

2.2. CARACTERES GENERAUX DES VERTEBRES

Toute vertèbre comprend deux parties (Fig 4) :

- . une partie antérieure renflée : le corps vertébral
- . un arc postérieur circonscrivant, avec la partie postérieure du corps, le trou vertébral ou rachidien par où chemine la moëlle épinière.

2.2.1. Le Corps vertébral a la forme d'un segment de cylindre; ses deux faces supérieure et inférieure, formées de tissu spongieux sont horizontales. La circonférence recouverte d'une corticale est déprimée à sa partie médiane. Le segment postérieur, en rapport avec le trou vertébral, est concave dans le sens transversal.

Le corps vertébral entouré d'une mince couche de tissu compact est en majeure partie formé de tissu spongieux dont l'ordonnance trabéculaire est visible sur les coupes et les radiographies. Les travées se croisent pour dessiner un réseau complexe sur lequel on distingue chez l'adulte 3 systèmes trabéculaires :

- un système horizontal radiaire (persistance du système radiaire infantile).
- un système vertical se continuant sur tout le rachis, créant une unité architecturale et assurant une fonction de soutien.
- un système oblique constitué par 2 faisceaux se continuant sur l'arc postérieur, un faisceau oblique supérieur et un faisceau oblique inférieur (fig. 5 et 6).

2.2.2. L'arc postérieur est formé en avant par les pédicules et en arrière par les lames vertébrales (fig. 4). Sept apophyses s'y implantent :

- Les pédicules placés de chaque côté de la face postérieure du corps vertébral sont aplatis transversalement. Leurs bords échancrés, avec les bords des vertèbres sus et sous jacents, limitent les trous de conjugaison.
- Les lames aplaties et quadrilatères ferment en arrière le trou vertébral.
- L'apophyse épineuse naît de l'angle d'union des lames et se dirige en arrière. Elle est aplatie transversalement, son sommet est libre.
- Les apophyses transverses s'implantent latéralement en arrière des pédicules.
- Les apophyses articulaires, au nombre de 4, sont verticales et implantées à l'union des pédicules et des lames. Les apophyses supérieure et inférieure, du même côté, sont articulées avec les apophyses sus et sous jacentes. Elles forment une petite colonne osseuse verticale située de chaque côté du canal rachidien.

2.3. CARACTERES PARTICULIERS REGIONAUX DES VERTEBRES

Les vertèbres ont des dimensions qui s'accroissent de la tête au bassin,

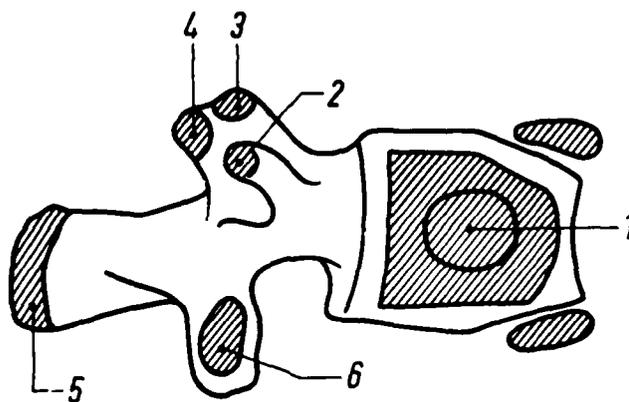


Figure 3 : Ossification et développement d'une vertèbre lombaire vue de profil
(d'après R. PATURET)

- 1) Centre primitif du corps
- 2) Point complémentaire transversaire
- 3) Point complémentaire apophyse articulaire supérieure
- 4) Point complémentaire tubercule mamillaire
- 5) Point secondaire épineux
- 6) Point complémentaire apophyse articulaire inférieure

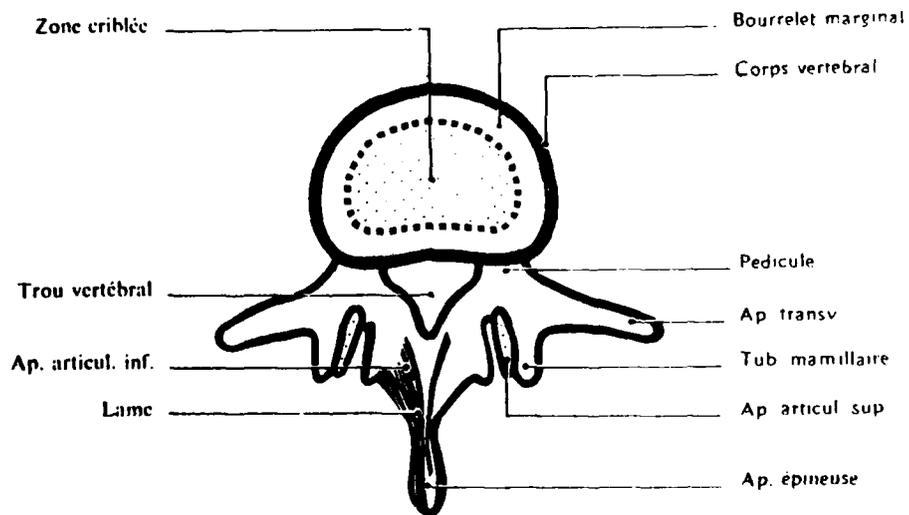


Figure 4 : Morphologie d'une vertèbre dorsale ou lombaire (d'après R. PATURET).

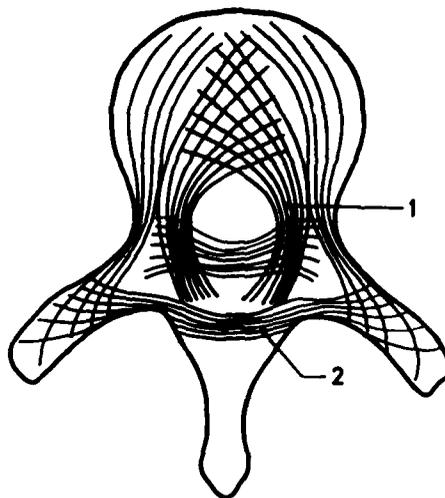


Figure 5 : Architecture d'une vertèbre vue d'en haut (d'après GALLOIS et JAPIOT) (442)

- 1) Faisceau oblique
- 2) Faisceau intertransversaire

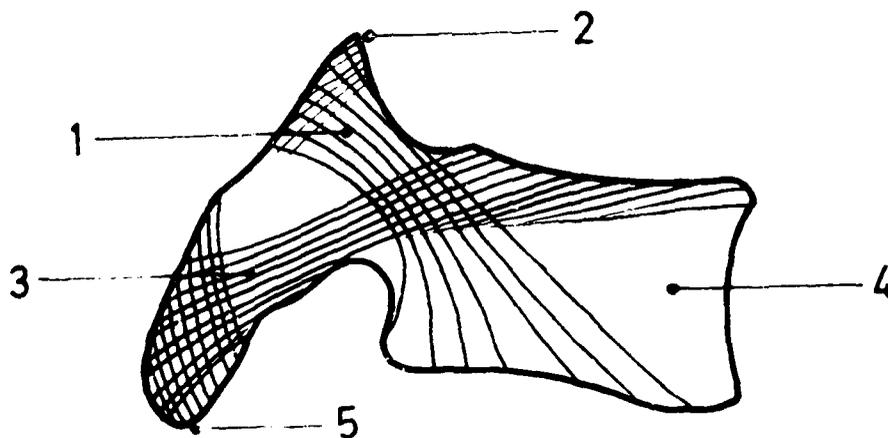
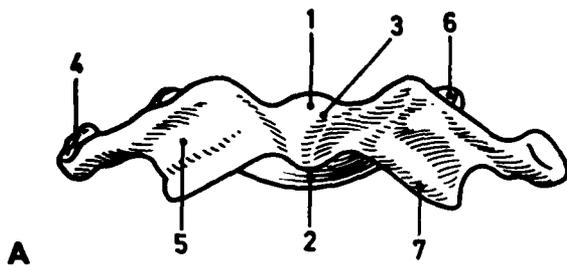
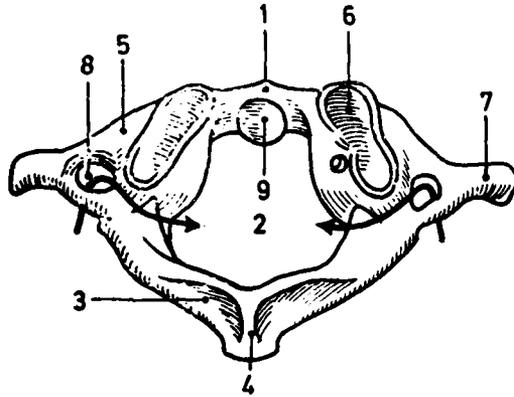


Figure 6 : Architecture d'une vertèbre vue de profil (d'après GALLOIS et JAPIOT) (442)

- 1) Faisceau oblique supérieur
- 2) Apophyse articulaire supérieure
- 3) Faisceau oblique inférieur
- 4) Zone vasculaire équatoriale
- 5) Apophyse épineuse



A



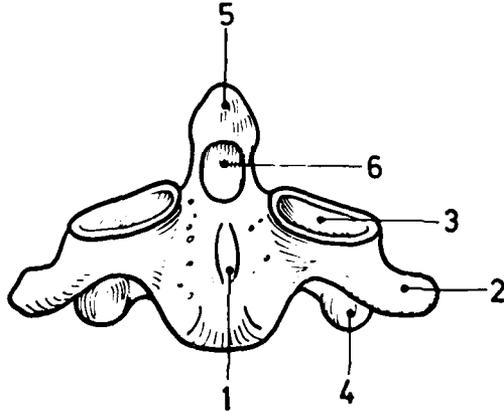
B

Figure 7 : a) Atlas vue antérieure

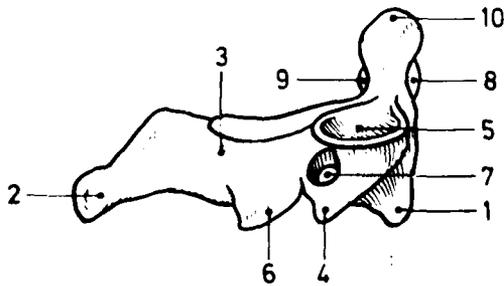
- 1) Arc antérieur
- 2) Arc postérieur
- 3) Tubercule antérieur
- 4) Apophyse transverse
- 5) Masses latérales
- 6) Facettes articulaires supérieures (cavités glénoïdes)
- 7) Apophyses articulaires inférieures d'après TESTUT (442)

b) Atlas vue d'en haut

- 1) Vue antérieure
- 2) Trou
- 3) Arc postérieur
- 4) Tubercule postérieur
- 5) Masses latérales
- 6) Facettes articulaires supérieures (cavités glénoïdes)
- 7) Apophyse transverse
- 8) Trou pour l'artère vertébrale (la flèche indique le trajet de l'artère)
- 9) Facette articulaire pour l'apophyse odontoïde.



A



B

Figure 8 : a) Axis vue antérieure

- 1) Corps
- 2) Apophyse transverse
- 3) Facette articulaire supérieure
- 4) Facette articulaire inférieure
- 5) Apophyse odontoïde
- 6) Facette articulaire placée à la face antérieure de cette apophyse pour l'arc antérieur de l'atlas

b) Axis - vue latérale gauche

- 1) Corps
- 2) Apophyse épineuse
- 3) Lame
- 4) Apophyse transverse
- 5) Apophyse articulaire supérieure
- 6) Apophyse articulaire inférieure
- 7) Trou pour l'artère vertébrale
- 10) Apophyse odontoïde avec 8 et 9 ses facettes articulaires (d'après TESTUT) (442)

proportionnellement au poids que les vertèbres doivent supporter.

Les vertèbres des différents segments cervical, dorsal, lombaire, sacré ou coccygien présentent des caractères propres qui sont particulièrement nets dans les régions moyennes de ces segments. Ces caractères se modifient aux extrémités de telle manière que le passage d'un type à l'autre soit graduel.

2.3.1. Les vertèbres cervicales

2.3.1.1. Les deux premières ont une morphologie particulière.

L'atlas est formé de 2 arcs :

- un arc antérieur dont la face interne est articulée à la face antérieure de l'odontoïde.

- un arc postérieur (fig 7)

Au niveau de chaque pédicule se développe :

- une apophyse articulaire supérieure, concave et articulée avec le condyle occipital
- une apophyse articulaire inférieure, horizontale, convexe et répondant à l'apophyse articulaire supérieure de l'axis, de même disposition, ce qui permet les mouvements de rotation de la tête.

L'axis (fig 8) a pour particularité d'avoir un corps surmonté de l'apophyse odontoïde. Ses apophyses articulaires inférieures prennent la morphologie de celles des vertèbres sous jacentes.

2.3.1.2. De C3 à C7 (fig 9), le corps présente, sur sa face supérieure deux éminences latérales : les apophyses unciformes. Les apophyses transverses s'implantent par 2 racines qui circonscrivent avec le pédicule, le canal transverse par où s'achemine l'artère vertébrale.

L'apophyse épineuse présente un sommet bifide, des facettes articulaires planes. Supérieures, elles regardent en haut et en arrière, inférieures en bas et en avant. Le trou vertébral est triangulaire à sommet postérieur.

2.3.2. Les vertèbres dorsales (fig 10 et 11) possèdent un corps plus épais. Près de l'insertion pédiculaire existent de chaque côté, deux facettes articulaires, supérieure et inférieure, destinées à s'articuler avec la tête des côtes. L'apophyse épineuse est longue et inclinée en bas et en arrière.

Les apophyses transverses présentent une facette costale qui répond à la tubérosité des côtes. Les apophyses articulaires regardent en arrière et en dehors pour la supérieure, en avant et en dedans pour l'inférieure. Le trou vertébral est circulaire.

2.3.3. Les vertèbres lombaires possèdent un corps volumineux, réniforme, à grand axe transversal. Les pédicules épais, horizontaux, s'implantent sur la moitié du corps vertébral à l'union face latérale et face postérieure. L'épineuse est rectangulaire, épaissie, horizontale. Les apophyses transverses, encore appelées apophyses costiformes, sont longues. Les articulaires supérieures sont aplaties transversalement. Leur face externe présente une saillie, le tubercule mamillaire. Les inférieures offrent une surface articulaire convexe qui regarde en dehors et en avant et glisse dans la concavité de l'apophyse articulaire supérieure sous jacente (fig 12).

Le trou vertébral est triangulaire.

2.3.4. Le sacrum et le coccyx prolongent vers le bas le rachis. Articulés entre eux, ils sont incurvés à concavité tournée vers l'avant. Alors que le sacrum résulte de la réunion de 5 vertèbres sacrés, le coccyx est formé par la fusion de 4 à 6 vertèbres atrophiées dont le volume diminue de haut en bas. Leur forme est donc celle d'une pyramide quadrangulaire aplatie d'avant en arrière, à base supérieure et à sommet inférieur.

La base du sacrum regarde en avant et en haut. Sa partie moyenne est formée par la face supérieure du corps de la 1ère vertèbre sacrée alors que ses parties latérales en forment des ailerons. En arrière des ailerons se dressent les apophyses articulaires supérieures dont la surface regarde en dedans et en arrière. Le canal sacré, formé aux dépens de la paroi postérieure du sacrum, prolonge et termine le canal rachidien (fig 13 et 15).

2.4. LES MOYENS D'UNION

Toutes les vertèbres sont unies entre elles par 3 éléments : le disque intervertébral, antérieur et deux articulations postérieures. Ces moyens sont renforcés par de puissants systèmes ligamentaires (fig 12 et 13). Les articulations intervertébrales sont semblables à tous les étages de la colonne vertébrale à l'exception des premières cervicales qui s'articulent avec la tête et de l'articulation sacro-vertébrale. Nous les étudierons dans un chapitre particulier après avoir envisagé les moyens d'union antérieure, puis les moyens d'union postérieure.

2.4.1. Les moyens d'union antérieure.

Les corps vertébraux sont articulés entre eux par leurs faces supérieure et inférieure. Les moyens d'union se composent des disques intervertébraux et de ligaments périphériques.

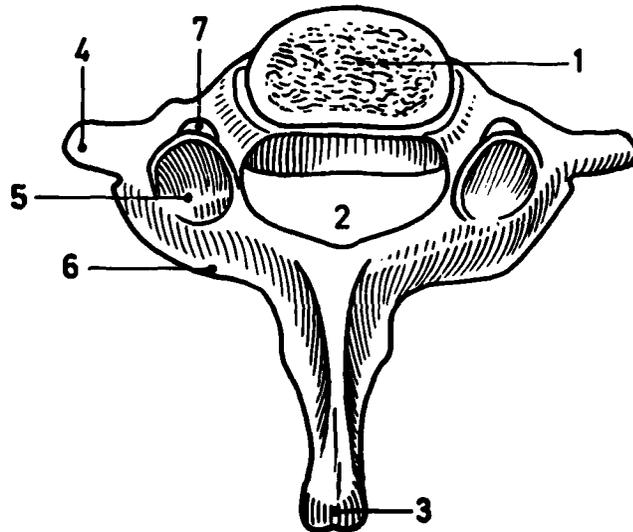


Figure 9 : Septième vertèbre cervicale vue d'en haut

- 1) Corps 2) Trou 3) Apophyse épineuse 4) Apophyse transverse
 5) Apophyse articulaire supérieure 6) Lame
 7) Trou pour l'artère vertébrale d'après TESTUT (442)

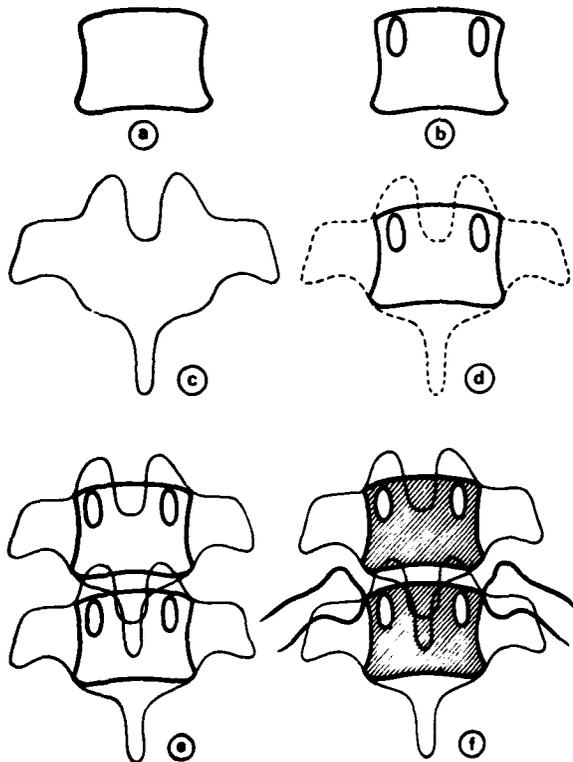


Figure 10 : Vertèbres dorsales
de face
 (sur des radiographies)

- a) corps
 b) corps et pédicules
 c) arc postérieur
 d) vertèbre
 e) assemblage de 2
 vertèbres
 f) articulations costo-
 vertébrales (incidence
 normale) d'après R.P.
 DELAHAYE et R.JOLLY (287)

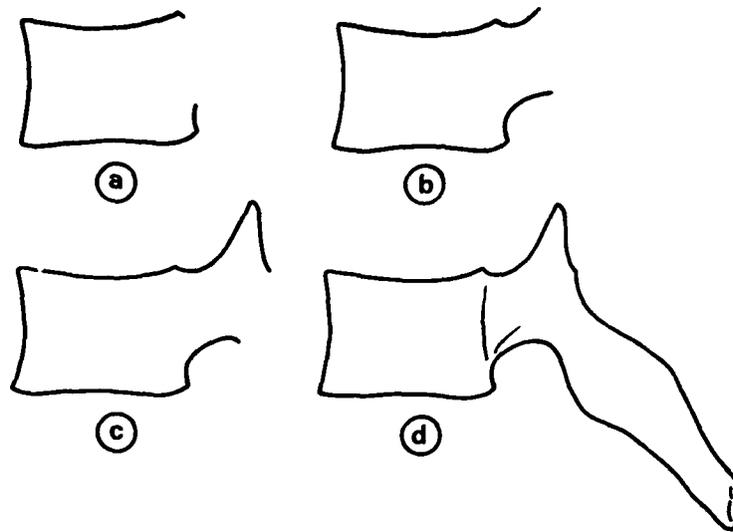


Figure 11 : Vertèbre dorsale de profil D 8 - sur des radiographies

- a) corps b) corps + pédicules
 c) corps + pédicules + apophyses articulaires supérieures
 d) corps + pédicules + apophyses articulaires supérieures
 + apophyses épineuses (287)

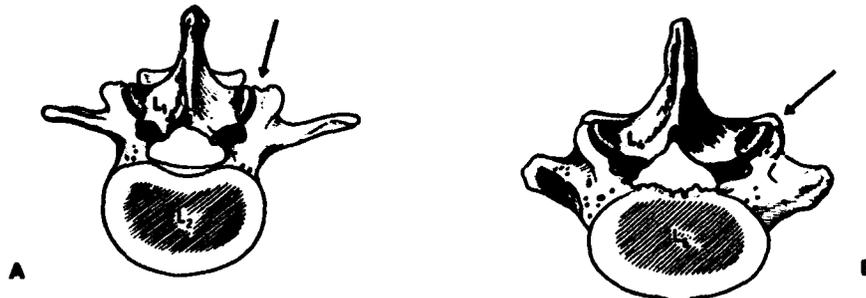


Figure 12 : Orientation des articulations apophysaires

- a) face supérieure du corps de L2 vue d'en haut. L'arc postérieur de L1 a été laissé en place mais ses pédicules coupés et le corps enlevé afin de bien montrer l'orientation des articulations apophysaires.
 b) face supérieure du corps de L5 vue d'en haut. L'arc postérieur de L4 a été laissé en place, ses pédicules coupés et le corps enlevé afin de bien montrer l'orientation des articulations apophysaires. La direction est très différente du cas précédent (d'après R. COLIEZ) (288)

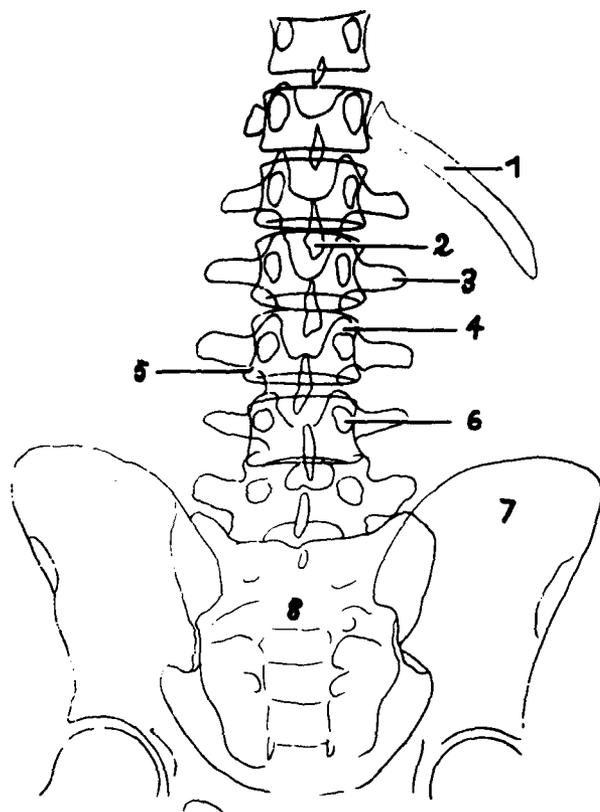


Figure 13 : Calque de la radiographie d'ensemble du rachis lombaire en incidence de face postéro-antérieure

- 1) 12^e côte
- 2) apophyse épineuse
- 3) apophyse transversaire
- 4) apophyse articulaire supérieure de L3
- 5) lame
- 6) pédicule
- 7) aile iliaque
- 8) sacrum (288)

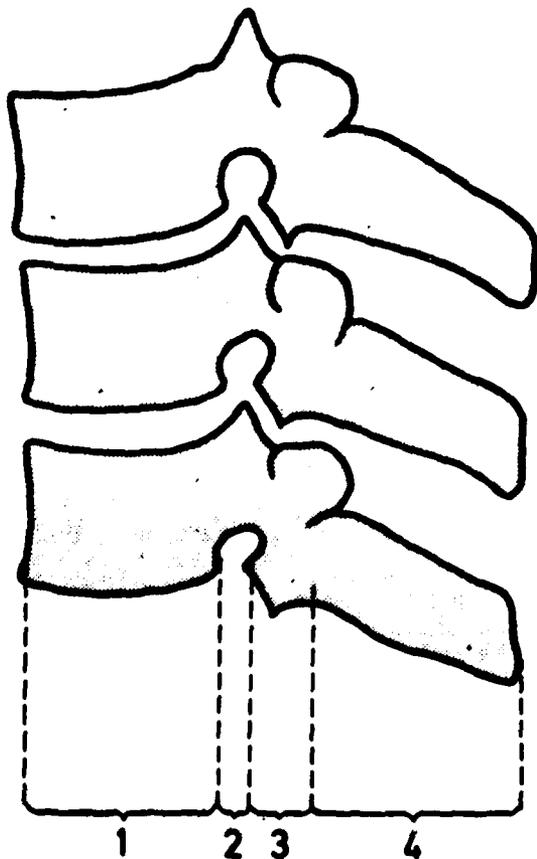


Figure 14 : Rachis de profil (d'après R.COLIEZ) (288)

- 1) colonne des corps et des disques
- 2) colonne des pédicules et du canal rachidien
- 3) colonne des massifs apophysaires
- 4) apophyses épineuses

Figure 15 : Sacrum

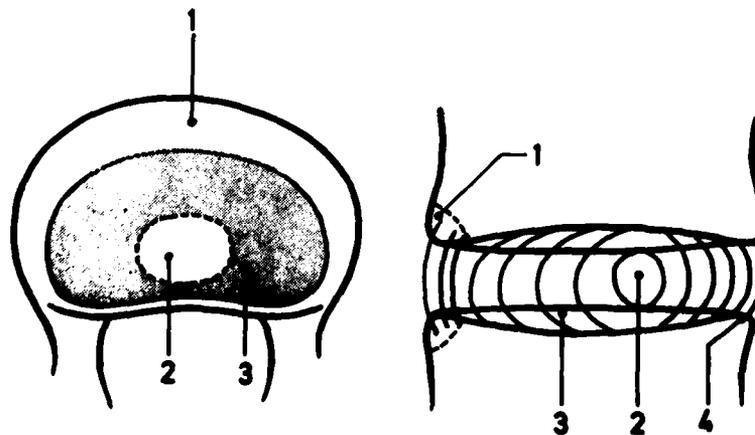
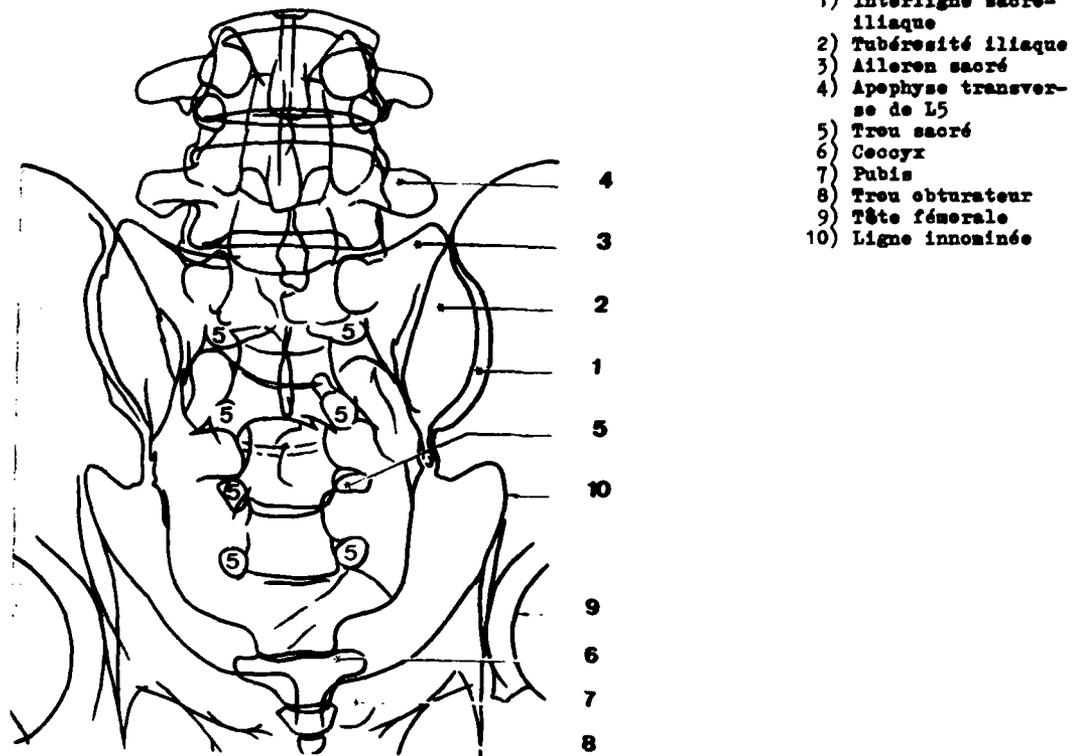


Figure 16 : Le disque intervertébral

- 1) Listel 2) Nucleus pulposus 3) à gauche : sone criblée
 3) à droite : plaque cartilagineuse 4) Rebord vertébral postérieur

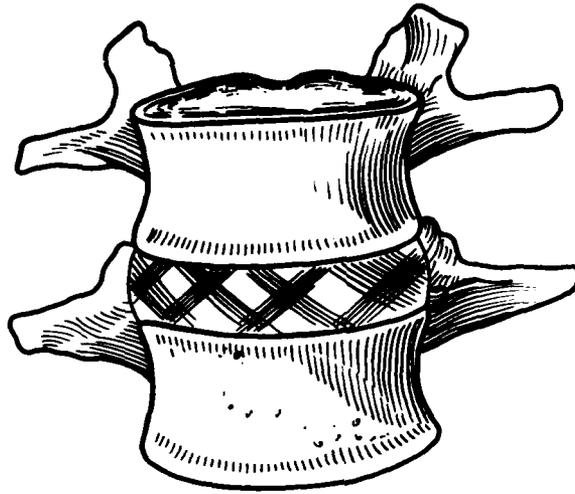


Figure 17 : Disque intervertébral lombaire (vue antérieure)

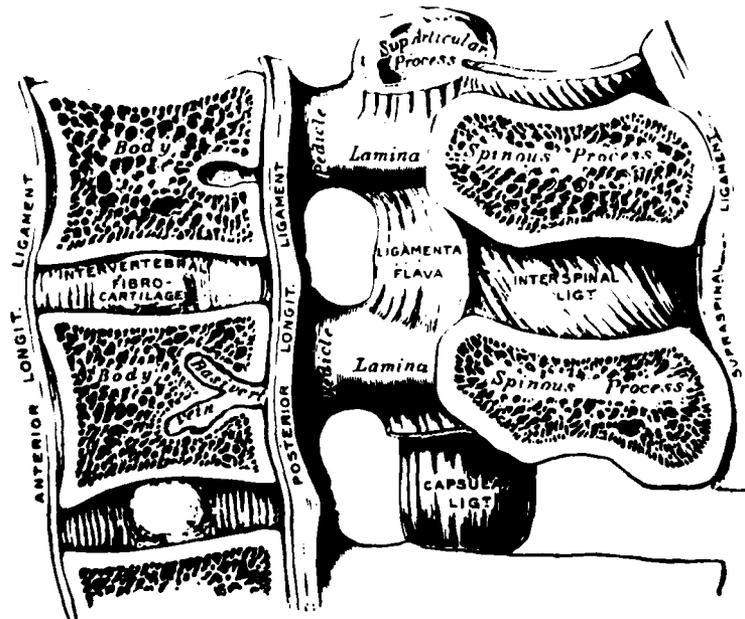


Figure 18 : Coupe de deux vertèbres lombaires des ligaments
(d'après EPSTEIN) The Spine 3^e édition (307)

2.4.1.1. Les disques intervertébraux (Fig 16 et 17).

Ils occupent les intervalles compris entre les corps vertébraux. Leur forme est celle d'une lentille biconvexe qui s'adapte et s'attache par ses faces aux surfaces articulaires des corps vertébraux.

La hauteur des disques diminue légèrement de la colonne cervicale où elle est uniforme (2 à 4 mm) jusqu'à la cinquième vertèbre dorsale. Elle augmente ensuite graduellement vers le bas et atteint ses plus grandes dimensions entre L4 et L5 (12 mm en moyenne) pour se réduire entre L5 et S1.

Le disque intervertébral comprend deux parties : l'une centrale, le nucleus pulposus et l'autre périphérique : l'annulus fibrosus (fig. 11 et 12).

- Le nucleus pulposus occupe 50 à 60% de la coupe du disque. C'est une masse gélatineuse ovale qui occupe la portion centrale du disque, plus près de son bord postérieur que du bord antérieur. Il se compose de corps cellulaires de type chondrocytaire dispersés à l'intérieur d'une matrice intercellulaire de fibrilles de collagène et d'agrégats, de protéoglycane qui confèrent au nucleus sa grande capacité d'imbibition aqueuse - AKESON W.H. et COLL (251) MORIS J.M. (377) - Selon son âge, il contient 90 à 75% d'eau. (TAYLOR T., LITTLE 439).

- L'annulus fibrosus se compose de lamelles concentriques essentiellement formées de fibres de collagène fixées au dessus et au dessous des corps vertébraux. Les fibres contenues à l'intérieur de chaque lamelle sont dispersées obliquement entre les vertèbres en couches successives. Elles se rangent ainsi perpendiculairement les unes par rapport aux autres. Les couches sont fermement liées par un ciment intercellulaire. La partie antérieure de l'anneau est deux fois plus épaisse que la partie postérieure. Il existe moins de ciment en arrière. Les fibres des couches les plus internes de l'annulus fibrosus passent dans le nucleus et font corps avec la matrice intercellulaire. Il n'y a pas de démarcation nette entre l'annulus et le nucleus mais une zone de transition.

2.4.1.2. Les ligaments périphériques (fig 18, 19, 20)

Ce sont 2 bandes fibreuses qui s'étendent sur toute la hauteur du rachis, l'une en avant, l'autre en arrière. On les nomme ligament vertébral commun antérieur et ligament vertébral commun postérieur.

- Le ligament vertébral commun antérieur descend sur la face antérieure de la colonne depuis l'apophyse basilaire de l'occipital jusqu'à la face antérieure du sacrum. Il adhère aux disques intervertébraux et aux vertèbres. Il se compose de fibres longues superficielles et de fibres courtes, profondes, qui ensèment 2 vertèbres voisines.

- Le ligament vertébral commun postérieur est situé sur la face postérieure des corps et des disques. Ses bords latéraux sont festonnés et il est plus large au niveau des disques qu'au niveau de la partie moyenne des corps. Il est constitué lui aussi, par 2 types de fibres.

2.4.2. Les moyens d'union postérieure (307) (326) (331) (416) (442)

Ils se composent eux aussi d'articulations postérieures et de ligaments.

2.4.2.1. Les articulations des apophyses articulaires :

Dans chacune de ces articulations, l'apophyse articulaire inférieure d'une vertèbre s'unit à l'articulaire supérieure de la vertèbre située au dessous. Les facettes articulaires sont planes dans les régions cervicales et dorsales, en segments de cylindre dans la région lombaire. Leur orientation est différente selon les étages.

2.4.2.2. Les ligaments (Fig 20, 21, 22).

Les ligaments jaunes, épais et très résistants, unissent les lames entre elles. Ils sont unis entre eux sur la ligne médiane. Leur face antérieure répond à la dure-mère.

Les ligaments inter-épineux sont des membranes fines qui occupent l'intervalle existant entre deux apophyses épi-

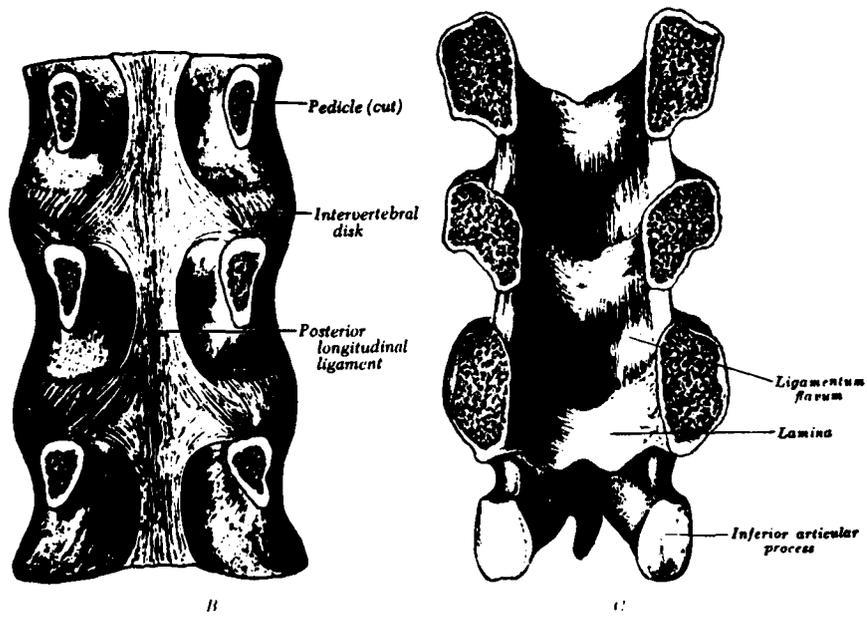


Figure 19 : Visibilité du ligament commun postérieur
(d'après EPSTEIN) (307)

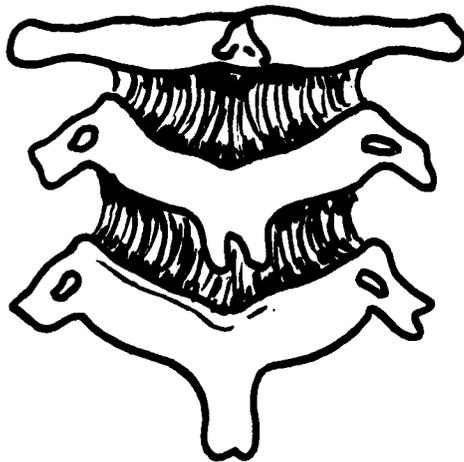


Figure 20 : Le ligament jaune à la colonne cervicale
(d'après GERLOCK)

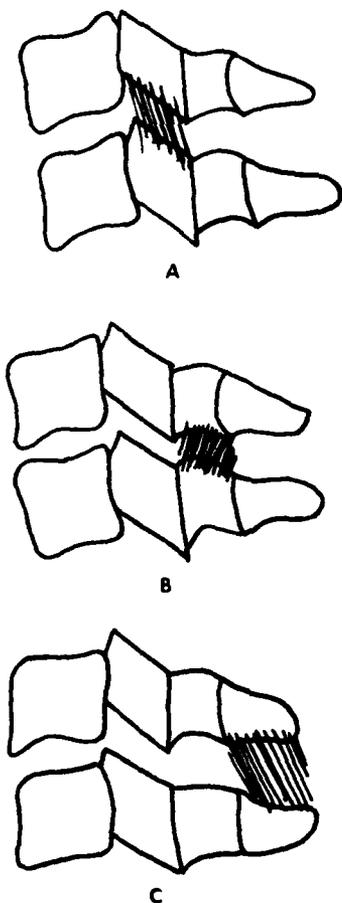
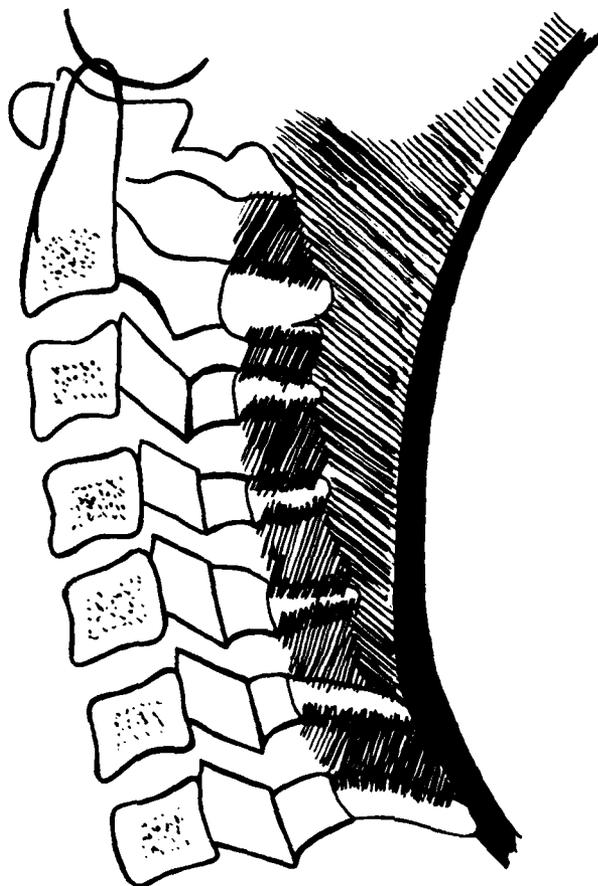


Figure 21 : (d'après GERLOCK)

- a) les ligaments capsulaires
- b) les ligaments jaunes
(les ligaments interépineux)

Figure 22 : le ligament vertébral
commun postérieur au cou
(d'après GERLOCK)



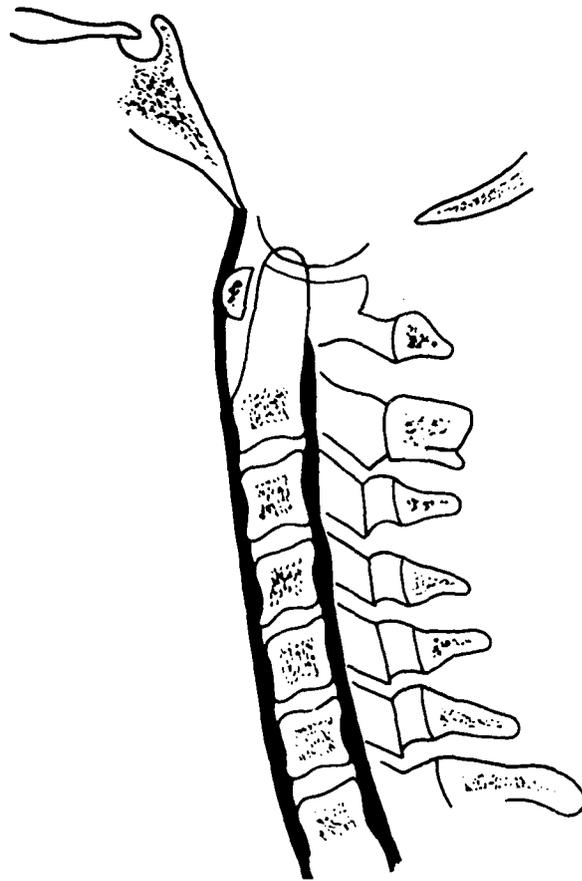


Figure 23 : le ligament vertébral commun antérieur et postérieur du cou

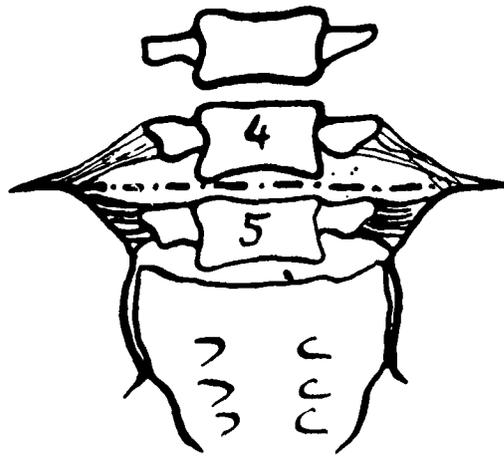


Figure 24 : les ligaments sacrolombaires

neuses.

Le ligament surépineux et sus-épineux est un cordon fibreux qui s'étend sur toute la longueur du rachis. Il adhère au sommet des apophyses épineuses. Au cou, il prend un très grand développement et se présente sous la forme d'une lame fibreuse triangulaire.

2.4.3. Moyens d'union des extrémités du rachis

2.4.3.1. Les deux premières cervicales.

L'atlas est uni à l'occipital par 2 articulations occipito-atloïdiennes. De chaque côté du trou occipital, la surface articulaire de la masse latérale de l'atlas, concave et elliptique est articulée à un condyle occipital. Deux ligaments puissants renforcent ces articulations occipito-atloïdiens antérieur et postérieur.

L'articulation atloïdo-odontoiïdienne est médiane. L'apophyse odontoiïde est reçue dans un anneau ostéofibreux fermé en avant par l'arc antérieur de l'atlas et en arrière par une lame fibreuse le ligament transverse. On donne le nom de ligament cruciforme au ligament transverse avec ses prolongements supérieur et inférieur. Des ligaments occipito-odontoiïdiens ont pour rôle de maintenir cette apophyse dans l'anneau atloïdien.

Les articulations atloïdo axoiïdiennes sont bilatérales. Les surfaces articulaires inférieures des masses latérales de l'atlas sont convexes, ainsi que les surfaces articulaires de l'axis. Sans ménisque interarticulaire, elles ne sont donc pas concordantes et permettent les mouvements de rotation de la tête. Des ligaments atloïdo axoiïdiens antérieur et postérieur, ainsi qu'un ligament occipito-axoiïdien renforcent ces articulations.

2.4.3.2. L'articulation sacro vertébrale est saillante en avant. Elle est à peu près semblable à celle qui unissent les vertèbres lombaires entre elles avec deux particularités intéressantes :

- la surface articulaire du corps de la première sacrée est inclinée à 30° sur l'horizontale et regarde en avant.
- les surfaces des apophyses articulaires supérieures du sacrum regardent un peu en dedans et surtout en arrière.

Il en résulte que la cinquième lombaire est à cheval sur la première sacrée. De plus en raison de l'inclinaison de la première sacrée le rachis aurait tendance à glisser en avant s'il n'était maintenu par les apophyses articulaires inférieures de la cinquième lombaire qui s'accrochent aux articulaires supérieures de la première sacrée.

Un ligament sacro vertébral réunit de chaque côté l'apophyse transverse de L5 à la partie antéro latérale de l'aileron du sacrum (fig 24).

2.5. LE RACHIS DANS SON ENSEMBLE (fig. 25, 26, 27)

La colonne vertébrale mesure en moyenne 75 centimètres de hauteur dont le tiers est formé par les disques intervertébraux. Les diamètres antéro postérieur et transversal atteignent leurs plus grandes dimensions au niveau de la base du sacrum. Ils diminuent vers le haut et vers le bas.

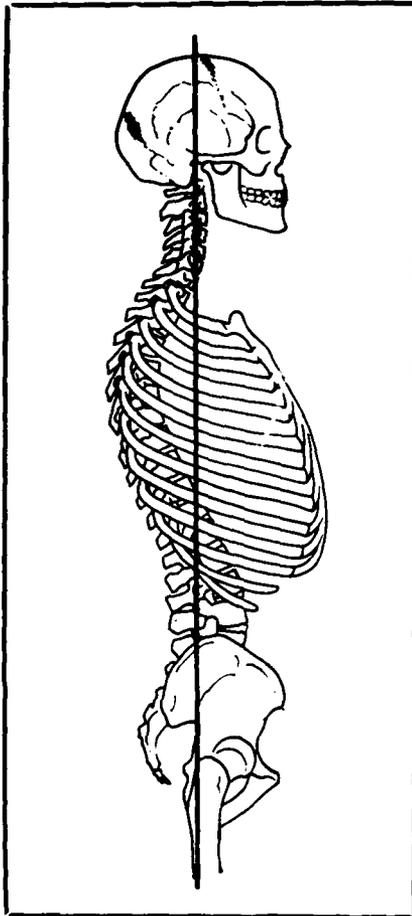
2.5.1. Dans le plan sagittal, il décrit les courbures qui se succèdent de haut en bas :

- la courbure cervicale est convexe en avant : c'est une lordose
- la courbure dorsale est concave en avant : c'est une cyphose, dont on peut mesurer l'angle, sur les radiographies, en prolongeant les plateaux supérieur de D4 et le plateau inférieur de D11. Il est normalement de 30 à 35°. Cette courbure est structurelle, due au fait que les faces antérieures des vertèbres sont moins hautes que les faces postérieures.

La courbure lombaire est lordotique. On en mesure la flèche entre les angles postéro supérieur du corps de L1 et postéro inférieur du corps de L5 et l'angle de renversement postérieur en abaissant la verticale à partir de l'angle postéro supérieur du corps de L1. Cette courbure comme la courbure cervicale est essentiellement due à la forme de cupule des disques intervertébraux.

La courbure sacro coccygienne a sa concavité dirigée vers l'avant et forme avec le rachis lombaire un angle dièdre ouvert en avant et dont la valeur moyenne est de 10°. Il se mesure en traçant les tangentes au plateau inférieur de L5 et supérieur de S1. Il traduit l'ouverture en avant du disque intervertébral L5 S1, plus haut en avant qu'en arrière et moins épais que le disque sus jacent L4 L5.

Ces courbures sont variables d'un sujet à l'autre et varient avec l'âge. Ces courbures anatomiques normales ont un fondement mécanique ; elles augmentent la souplesse et la capacité d'amortissement du rachis tout en lui conservant une bonne



**Figure 25 : Statique sagittale de l'ensemble du rachis montrant
les 3 courbures : cervicale, dorsale et lombaire**

rigidité et une stabilité au niveau des articulations intervertébrales (Panjabi M.M. et White A.A. III) (390.391). Lorsque des forces s'appliquent à la colonne entière, la lordose cervicale et lombaire s'aplatit plus vite que la cyphose dorsale.

2.5.2. Dans le plan frontal, le rachis est théoriquement rectiligne. En fait, les courbures sont répandues. Elles sont généralement discrètes, ne s'accompagnent pas d'une rotation des corps vertébraux et on parle d'attitude scoliotique. Extrêmement fréquente, elle ne possède pas de signification pathologique. Pour Testut elle serait classique à l'étage dorsal et à concavité gauche en rapport avec le passage de l'aorte.

La face antérieure du rachis offre donc une colonne cylindrique, formée par la superposition des corps vertébraux et dont le volume ainsi que la résistance augmente régulièrement de haut en bas. La face postérieure présente la crête épinière constituée par la superposition des apophyses épineuses et sur les côtés, la gouttière vertébrale. Les faces latérales montrent en arrière des corps les pédicules et les trous de conjugaison, les apophyses transverses et articulaires.

On peut schématiser 4 parties (fig 14)

- la colonne des corps et des disques,
- la colonne des pédicules et du canal rachidien
- la colonne des massifs apophysaires,
- les apophyses épineuses.

2.6. LE RACHIS EN POSITION ASSISE (52, 53, 57).

" Les courbures de la colonne vertébrale ne sont pas primitives, mais acquises. Pendant la première période de la vie intra utérine, la colonne est sensiblement rectiligne ou décrit, dans son ensemble, une légère courbe concave en avant. Au cinquième mois, commence à s'accuser l'angle sacro-vertébral, établissant la limite respective des régions lombaire et sacrée. Mais même à la naissance, il n'existe aucune trace des inflexions qui caractérisent la région cervicale et la région lombaire. Ces inflexions ne se dessinent qu'à plus tard ; la première dans les 3, 4, 5^e mois qui suivent la naissance, la seconde de 3 à 5 ans " L. TESTUT (442).

Cette ensellure lombaire selon les sujets, est plus ou moins marquée. Elle n'existe pas chez les quadrupèdes et le nouveau-né.

Que se passe-t-il quand l'homme passe de la station debout à la position assise ? L'ensellure lombaire a tendance à s'effacer et la cyphose dorsale physiologique est beaucoup moins importante. La courbure cervicale, la plupart du temps, reste pratiquement inchangée. J.J. KEEGAN (147) insiste sur le rôle important des muscles postérieurs de la cuisse et des muscles fessiers dans l'effacement de la courbure lombaire en position assise. Mais si les cuisses sont fléchies sur le tronc, il se produit une rotation du bassin et la lordose disparaît entièrement.

Des études radiographiques que nous avons entreprises, soit à l'Hôpital Dominique LARREY, soit à l'hôpital BEGIN, confirment ces changements de la statique rachidienne mais ces faits sont fortement influencés par l'état du rachis, par l'inclinaison du siège et par le degré d'enfoncement du sujet dans le siège.

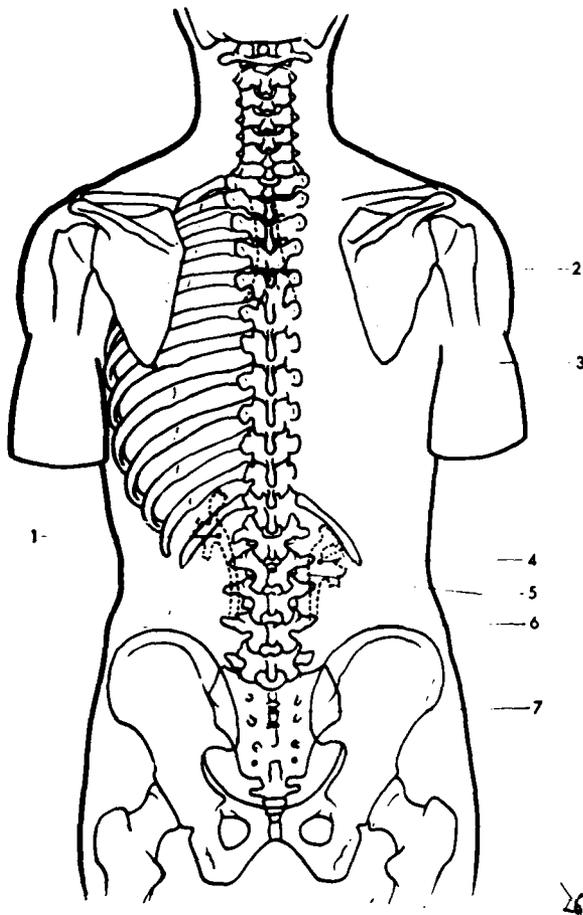


Figure 26 : Principaux repères du rachis de face (d'après R.COLIEZ)

- 1) Bassinet gauche - corps de L1
- 2) Bifurcation trachéale - disque D4 D5
- 3) Pointe omoplate D7
- 4) Bassinet droit - corps L2
- 5) Fin de la moëlle épinière cône terminal L2
- 6) Crêtes disques L4
- 7) Fin du sac dural S2

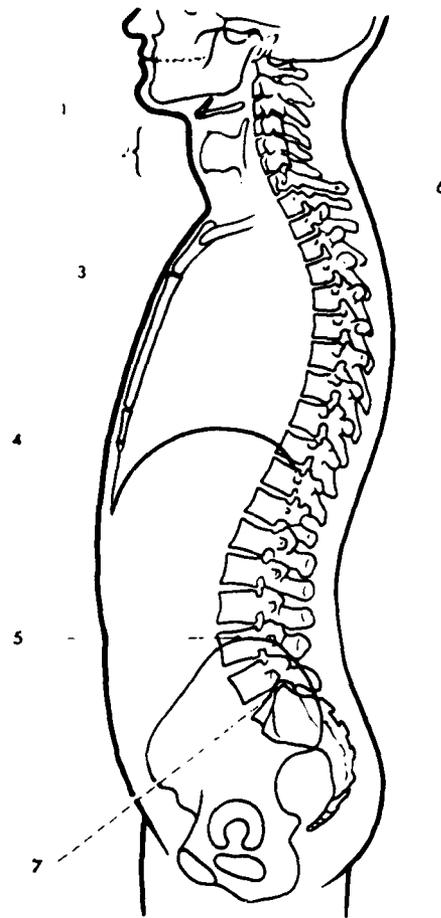


Figure 27 : Principaux repères du rachis de profil (d'après R.COLIEZ)

- 1) Hyoïde (3)
- 2) Thyroïde (C4-C5)
- 3) Angle de Louis D4
- 4) Appendice xyphoïde (environ D10-D11)
- 5) Crête iliaque corps L4
- 6) Apophyse épineuse C7 proéminente
- 7) Bissectrice disque lombosacré.

Atlas.....	Pointe de la mastoïde, voûte palatine.
Axis	Maxillaire supérieur (bord alvéolaire).
C3	Os hyoïde.
C4 - C5	Cartilage thyroïde.
C6	Cartilage cricoïde.
C7	Apophyse épineuse proéminente.
D4	Angle de Louis
D6-D7	Angle de l'omoplate
D8	Ligne mamelonnaire (homme).
D9-D11	Appendice xiphéide.
L4	Ligne bicrête. Elle passe généralement un peu au-dessous de l'ombilic dont la situation trop variable ne permet pas de le considérer comme un repère fixe.
S2	Ligne bispinale (épinos iliaques antéro-supérieures).

Tableau des points de repère osseux

CHAPITRE 3 : BIOMECHANIQUE DU RACHIS

C. KLEITZ et R.P. DELAHAYE

S O M M A I R E

- 3.1. BIOMECHANIQUE DU DISQUE INTERVERTEBRAL
 - 3.1.1. Caractéristiques de compression
 - 3.1.2. Propriétés de tension
 - 3.1.3. Caractéristiques de flexion
 - 3.1.4. Réponse à la torsion
 - 3.1.5. Résistance au cisaillement
 - 3.1.6. Fluage et relaxation
 - 3.1.7. Hystérésis
 - 3.1.8. Résistance à la fatigue
 - 3.1.9. Pression discale
 - 3.1.10 Phénomène d'autocolmatage
 - 3.1.11 Biomécanique fonctionnelle du disque
- 3.2. BIOMECHANIQUE DES LIGAMENTS INTERVERTEBRAUX
 - 3.2.1. Ligaments vertébraux communs antérieur et postérieur
 - 3.2.2. Ligament jaune
 - 3.2.3. Ligaments inter et sus épineux
 - 3.2.4. Rupture du ligament - rupture de l'os
 - 3.2.5. Biomécanique fonctionnelle des ligaments
- 3.3. BIOMECHANIQUE DE LA VERTEBRE
 - 3.3.1. Le corps vertébral
 - 3.3.2. L'arc neural
 - 3.3.3. Biomécanique fonctionnelle de la vertèbre
- 3.4. BIOMECHANIQUE DE LA COLONNE VERTEBRALE
- 3.5. ROLE DE LA CAGE THORACIQUE ET DE LA MUSCULATURE.

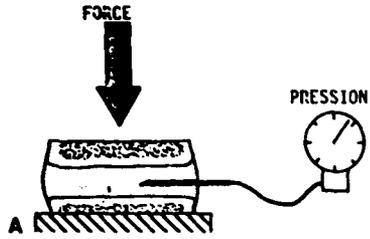
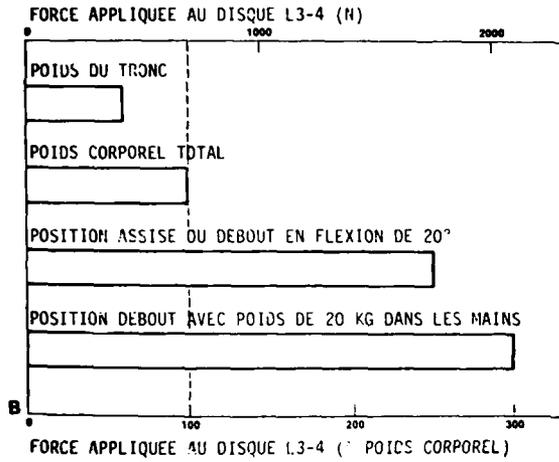


Figure 28 : Pression intradiscale mesurée par une sonde manométrique introduite dans le nucleus pulposus d'une unité fonctionnelle de cadavre. (d'après A. NACHEMSON)



Mesures chez des volontaires avec la même sonde mise au niveau L3 - L4 en faisant varier la position et en effectuant une tâche.

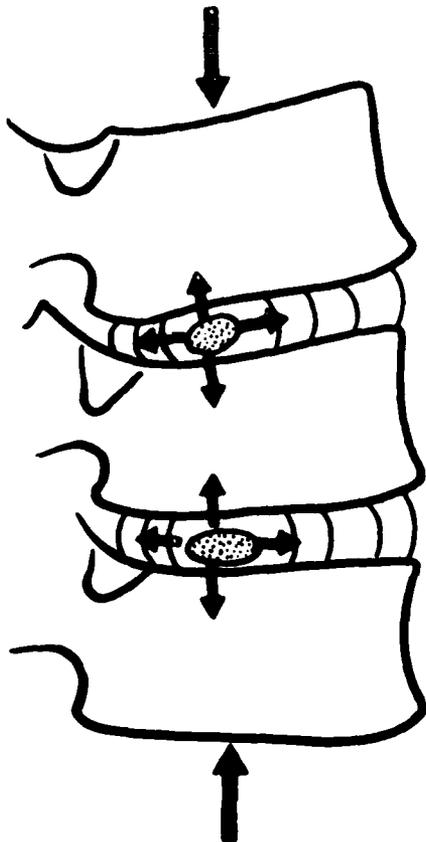


Figure 29 : Schéma du sens de la répartition des premiers exercices sur le nucleus pulposus et les déformations du disque intervertébral.

La colonne vertébrale est une structure mécanique complexe où les vertèbres s'articulent de manière contrôlée par un ensemble d'articulations de ligaments et de leviers. La longue structure mince est rendue rigide par la cage thoracique.

Le rachis possède au moins trois fonctions biomécaniques fondamentales :

- il transfère les poids et les mouvements de flexion de la tête et du tronc au pelvis
- il permet un mouvement physiologique entre tête, tronc et pelvis,
- il protège la moëlle épinière des traumatismes engendrés par les forces et les mouvements.

La biodynamique du rachis a suscité de très nombreux travaux. Il faut tout particulièrement citer l'étude très documentée de White A.A. III et Penjabi M.M. (449) dont nous nous sommes largement inspirés pour écrire ce chapitre.

3.1. BIOMECHANIQUE DU DISQUE INTERVERTEBRAL (251) (377) (449)

Le disque intervertébral qui assure de nombreuses fonctions est assujéti à une diversité considérable de forces et de moments de forces.

Il supporte toutes les forces de compression auxquelles est soumis le tronc (334). Ces forces sont d'autant plus importantes que le poids de la partie du corps située au dessous de lui augmente. Selon Nachemson (378) (380) la force s'exerçant sur un disque lombaire en position assise est égale à plus de 3 fois le poids du corps. Par ailleurs, la moindre activité suscitant des charges dynamiques entraîne un surcroît de charge au niveau du disque pouvant atteindre le double de la charge soutenue en position statique (fig 28).

Le disque intervertébral est soumis à d'autres types de forces et de contraintes

- les contraintes de tension apparaissent au cours des mouvements d'antéflexion, d'extension et de latéro-flexion.
- la rotation axiale du tronc par rapport au pelvis crée des forces de torsion produisant à leur tour des contraintes de cisaillement à l'intérieur du disque.

Les forces agissant sur le disque intervertébral se divisent en deux types :

- une force de courte durée et de faible amplitude provoquant des lésions discales irréparables si elle est plus importante que la contrainte de rupture en un point donné ;
- une force de faible amplitude et de longue durée engendre des lésions discales dues à la fatigue.

Le mécanisme est différent car le disque intervertébral possède certaines propriétés variant dans le temps : la fatigue et la visco-élasticité qui se caractérisent par l'hystérésis, le fluage et la relaxation (White A.A. et Penjabi M.M.) (449).

3.1.1. Les caractéristiques de COMPRESSION (fig 29, 30 et 31).

De nombreuses études ont été conduites sur des modèles expérimentaux comportant généralement des segments vertébraux, c'est à dire au moins deux vertèbres et un disque intervertébral ainsi que sur des calculs de simulateurs (349). Une force de compression uniaxiale est utilisée. -Brown (267) Farfan (312) Hirsch et Nachemson (334,335) Roaf (406, 407) Virgin (445) Evans (309,310) - La courbe représentant la force et la déformation dues à la compression est très utile pour expliquer le comportement physique des specimens expérimentaux très différents selon les expériences. Cette courbe est de nature sigmoïde. Initialement concave vers l'axe de la force, elle devient rectiligne, puis convexe peu de temps avant la rupture. Cette représentation graphique implique que le disque oppose peu de résistance aux forces modérées. Il conserve sa souplesse. Puis, il se raidit à mesure que les forces augmentent et assure sa stabilité. Soumis à des forces très importantes et même après incision postéro-latérale de l'annulus fibrosus, aucune hernie discale n'apparaît sous l'effet de la seule compression Virgin (445), Hirsch (334,335) Markoff et Moriss (373). Les forces relatives du disque et du corps vertébral ont été comparées par Brown et Coll (267) sur des unités fonctionnelles de la colonne lombaire. La première composante cédant à la compression est la vertèbre par suite de la fracture des plateaux. Le disque n'est jamais rompu. Le mode de rupture dépend de l'état du corps vertébral (ostéoporose). Les plateaux des vertèbres ostéoporotiques et le tissu osseux sous jacent se tassent beaucoup sous des forces relativement faibles (fig 31).

Farfan (312, 313) démontre que le disque dégénéré résiste moins à la compression que le disque normal, fait corroboré par l'observation clinique des ruptures et des hernies discales plus fréquentes après 50 ans. Des études entreprises après oncofication discale (discographie) montrent qu'avant la fracture des plateaux, le nucleus pénètre dans le corps vertébral, y créant une hernie intraspongieuse. On peut en conclure que la tendance du disque à subir une hernie postéro-latérale souvent mise en évidence en clinique, dépend certainement de forces autres que celles de compression (440).

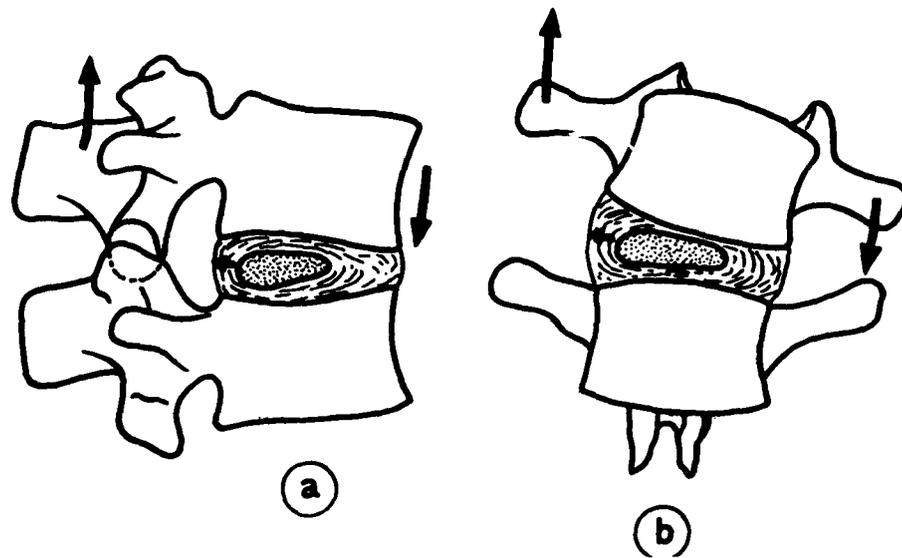


Figure 30 : Schéma du déplacement et des déformations du nucleus pulposus et de l'anneau fibreux au cours des mouvements de la colonne vertébrale d'après R. PATURET
 a) flexion antérieure
 b) flexion latérale

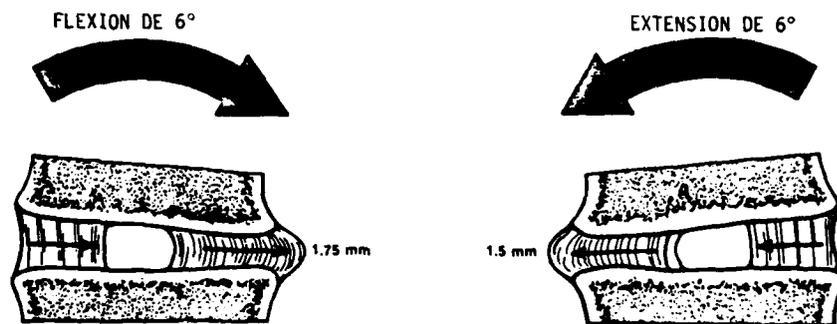


Figure 31 : Saillie du disque en flexion et en extension. La flexion et l'extension de la colonne vertébrale impriment au disque un mouvement horizontal.
 Dans les 2 cas, il y a saillie du disque du côté concave et contraction du côté convexe (d'après T. BROWN Hansen R.J. et YORRA A. (267))

3.1.2. Les propriétés de TENSION

L'antéflexion, l'extension et la latéro-flexion physiologiques soumettent l'annulus fibrosus à des tractions axiales. La rotation axiale entraîne également une contrainte de tension inclinée de 45° par rapport à l'axe de la colonne vertébrale. La compression entraîne aussi des contraintes de tension. Le disque est donc assujéti à des forces de tension en toutes directions. Des courbes de résistance à la traction axiale établies par Brown (267) il est possible d'observer que les régions antérieures et postérieures sont en général plus résistantes que les régions latérales et centrales (nucleus pulposus). Dans des directions autres qu'axiales (Galante) (321) le disque est trois fois plus résistant dans le sens des fibres de l'annulus que dans le sens horizontal.

3.1.3. Les caractéristiques de FLEXION

Les forces appliquées en flexion et en torsion sont bien plus traumatisantes pour le disque que les forces de compression, comme l'indiquent certains résultats expérimentaux (312).

Au moindre mouvement physiologique normal la partie antérieure du disque fait saillie en flexion. En extension, c'est la partie postérieure et dans la flexion latérale, le disque fait saillie du côté concave de la courbure, alors qu'il se contracte du côté convexe (Brown, 267). Roaf (406) a démontré que le nucleus pulposus au cours de ces mouvements ne change ni de forme ni de position.

3.1.4. Réponse à la TORSION

Farfan (311) pense que la torsion pourrait être la cause principale des traumatismes rachidiens. Expérimentalement, il enregistre de façon continue la déformation du disque d'une unité fonctionnelle vertèbre disque vertèbre (éléments postérieurs compris) soumise à une torsion autour d'un axe fixe passant par la partie postérieure du disque. Les courbes obtenues ont un aspect sigmoïdal. Pour provoquer la rupture du disque, une rotation moyenne de 16°, pour les disques normaux, est nécessaire. Pour les disques dégénérés, l'angle de rupture est moindre 14°5 dans les conditions expérimentales choisies.

3.1.5. Résistance au CISAILLEMENT

Le disque au cours d'une torsion est soumis à des efforts de cisaillement qui ne sont pas uniformément répartis. Ils sont plus importants en périphérie et faibles au centre. Des expériences de cisaillement en plan horizontal (axe horizontal, antéro postérieur) sont réalisées sur des disques lombaires. Une force importante est nécessaire pour créer une lésion. Cette valeur de l'ordre de 260 Newton pour (373) a son importance en clinique. Effectivement, il faut une force importante pour provoquer un déplacement horizontal anormal d'un disque normal. Il est rare que l'annulus soit cliniquement lésé par un cisaillement. Les cas cliniques de rupture annulaire résultent très certainement de combinaisons de flexion, de torsion et de traction.

3.1.6. Fluage et relaxation

Le fluage est la déformation du disque dans le temps accompagnant l'application d'une charge sur ce disque. Kazarian (344) effectue des tests sur des segments de colonne et classe les disques en 4 catégories selon leur degré de dégénérescence (fig 32).

Le disque non dégénéré présente une plus faible déformation globale qui apparaît moins rapidement que pour le disque dégénéré.

Le processus de dégénérescence diminue donc la visco-élasticité du disque. En d'autres termes, le disque en dégénérescence devient de moins en moins capable d'amortir les chocs et de répartir uniformément la force appliquée sur l'ensemble du plateau vertébral.

Remarquons qu'il n'existe aucun modèle expérimental acceptable pour reproduire le problème clinique de la dégénérescence discale.

3.1.7. Hystérésis (fig 33)

L'hystérésis est un phénomène consistant à une perte d'énergie lorsqu'une structure est soumise à des cycles répétitifs de compression et de décompression. L'hystérésis des tissus biologiques exprime l'irréversibilité de leur comportement histomécanique et se manifeste plus ou moins fort dans ces tissus. Virpin (445) a observé le premier ce mécanisme de protection au niveau des disques. Cet hystérésis croît avec la force appliquée. Plus important à l'étape lombaire inférieur, il diminue avec l'âge. Cet hystérésis diminue s'il est soumis une seconde fois à la force, ce qui signifie que le corps est moins bien protégé contre les agressions répétitives (fig 33).

3.1.8. Résistance à la fatigue

Le disque possède une faible capacité biologique de restauration et de

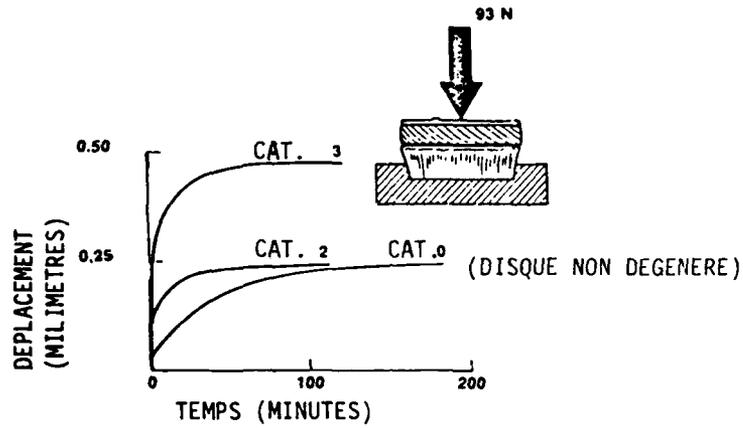


Figure 32 : Fluage du disque (d'après KAZARIAN L.E. - 344)
 Le disque non dégénéré (catégorie 0) se déforme moins vite et plus facilement que le disque dégénéré (catégorie 3)

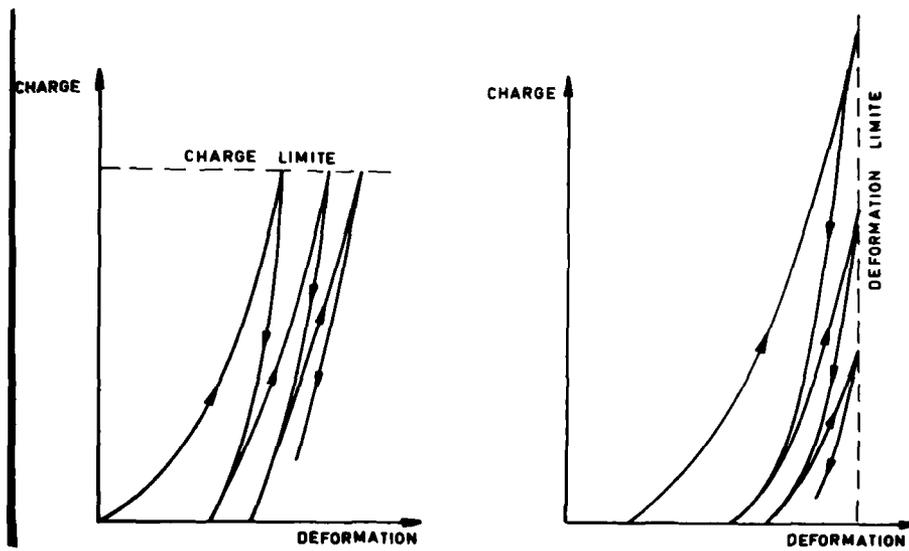


Figure 33 : Bandes d'hysteresis des tissus biologiques limitées par la charge et la déformation d'après HARTUNG et ANNA O. (332)

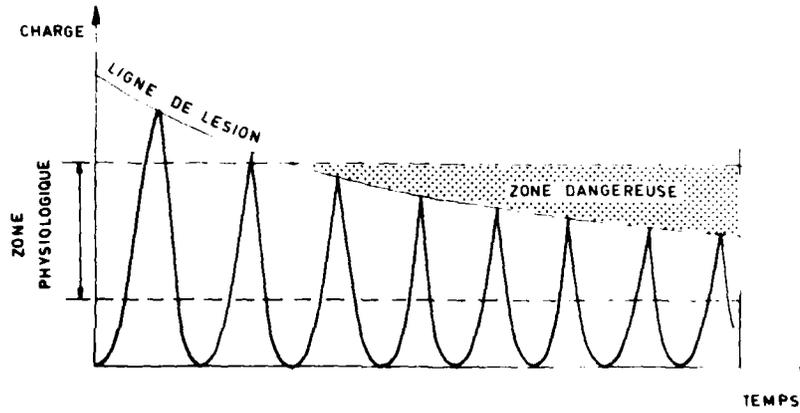


Figure 34 : Essai de résistance en fonction de la durée avec charges et décharges limitées par la déformation : la charge maximale diminue.
(d'après HARTUNG C. et ANHA O.) (332)

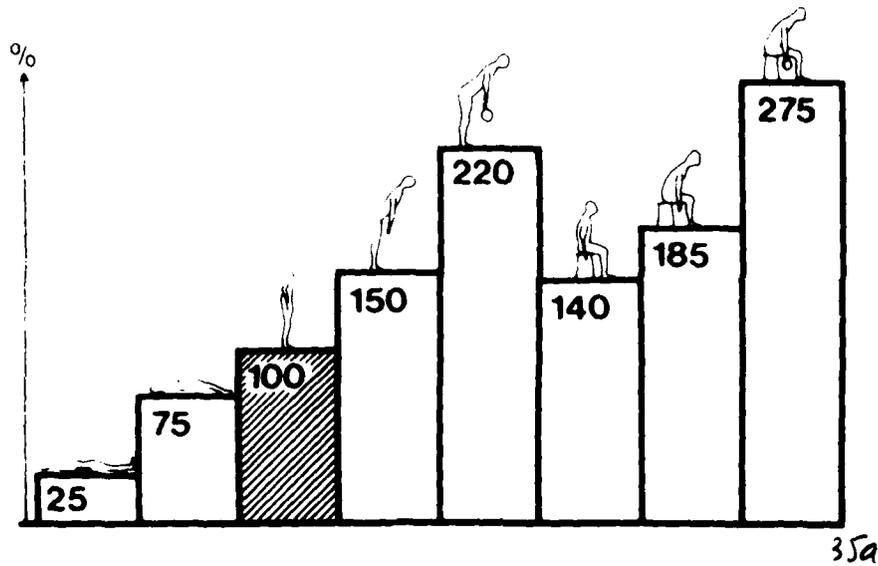


Figure 35 a : Pression discale in vivo (L3) lors d'exercices et de positions variés. La pression en position assise est plus grande qu'en position debout.
(d'après HACHEMSON A.L.) (383)

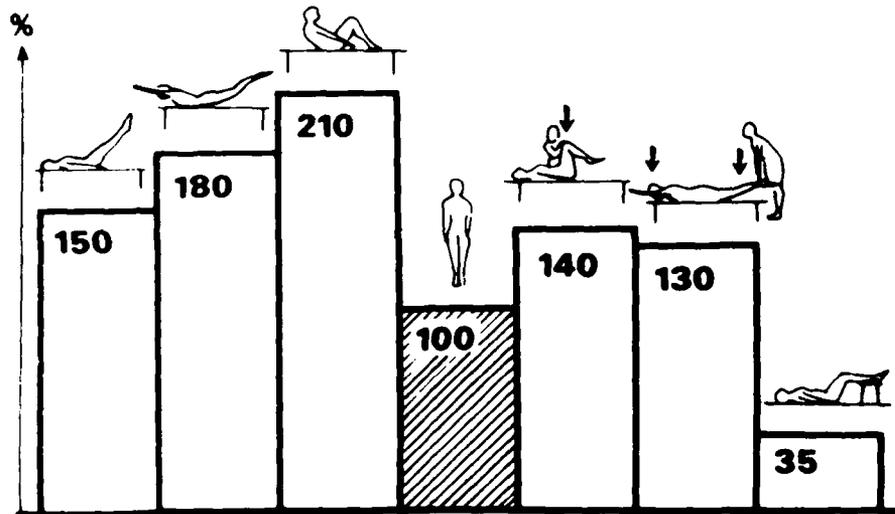


Figure 35 b : d'après A.L. HACHEMSON : variation en position couchée.

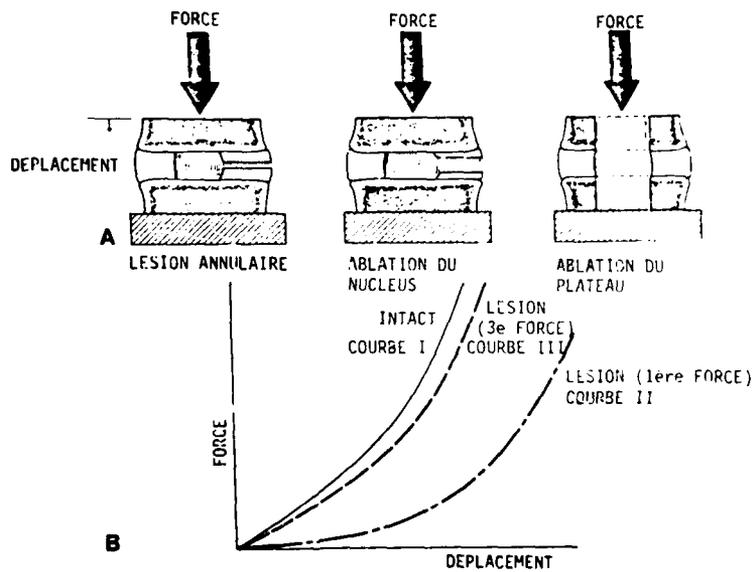


Figure 36 : Comportement biomécanique du disque lésé.
 A partir de 3 modèles de lésions : lésion annulaire provoquée par perforations de la paroi postérolatérale de l'annulus laissant un orifice de 3-4 mm de diamètre, ablation de la totalité du nucleus par tunnel percé dans l'annulus, ablation des plateaux vertébraux par excision du nucleus.
 Comportement analogue des 3 modèles.

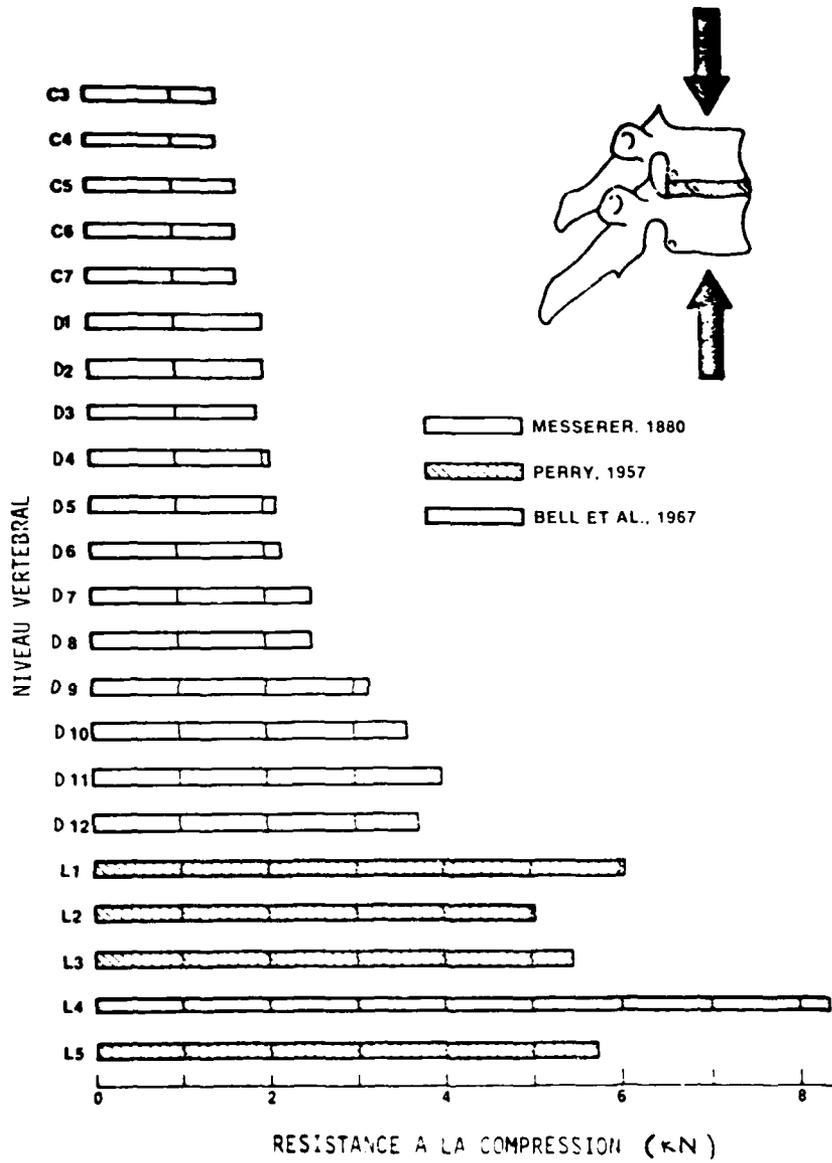


Figure 37 : Résistance à la compression
(d'après WHITE III A.A. et PANJABI M.M.) (449)

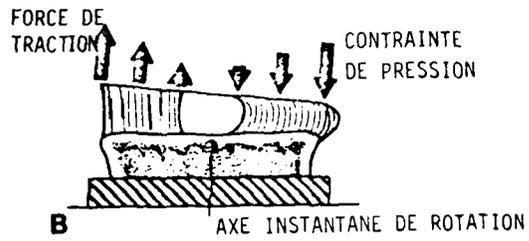
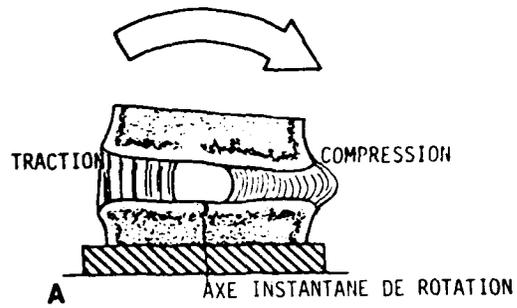


Figure 38 : Contraintes induites par flexion
(d'après WHITE III A.A. et PANJABI M.M.) (449)

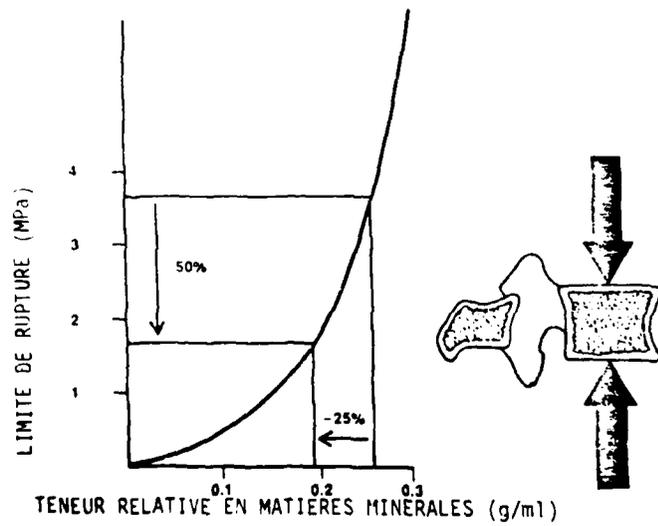


Figure 39 : Relation entre tissu osseux et résistance vertébrale

régénération. Peu d'études documentées sont signalées dans la littérature. Brown (267) prouve expérimentalement que la résistance du disque à la fatigue est faible. La tolérance in vivo reste difficile à apprécier.

La figure 34 extraite de l'article de Hartung et Anna O. (332) représente la représentation théorique du phénomène de fatigue par charges et décharges continues. Il apparaît que la charge maximale tolérable diminue au fur et à mesure de la répétition. Si la ligne de lésion coupe la zone physiologique sur un organe donné, le danger d'une rupture (pour le disque) ou d'une fracture (pour l'os) est de plus en plus grand.

3.1.9. Pression intradiscale

Il est difficile de déterminer l'importance des forces appliquées au disque. Nachemson et Coll (378) (379) (380) les ont déterminé in vivo en partant du principe que le nucleus est un capteur de force. Ils ont établi que la pression du milieu liquide à l'intérieur du nucléus était directement liée à la poussée axiale appliquée au disque. La précontrainte des disques a pu être appréciée en mesurant la pression intradiscale des disques L3 L4 chez des volontaires à l'aide d'une aiguille spéciale munie d'un manomètre électronique. Le disque supporte une force assez importante évaluée à 120 N environ bien que le disque L3 L4 ne supporte que 60% du corps. En position assise ou debout, en flexion à 20°, cette force atteint 200% du poids du corps. Si le sujet est debout avec un poids de 20 kgs dans les mains, cette force avoisine 300% du poids du corps (fig. 35).

3.1.10. Phénomène d'autocolmatage (fig. 36)

Le disque n'est pas directement vascularisé et il est vraisemblable qu'un mécanisme particulier de restauration entre en jeu : l'autocolmatage. Markoff (373) et Morris (377) démontrent expérimentalement qu'il se produit un phénomène d'adaptation très particulier ne dépendant pas de la viscosité ou de la souplesse du disque. Mais il faut remarquer que ces expériences n'utilisaient qu'un seul type de force : la compression. De plus, cette restauration immédiate est-elle définitive ou se modifie-t-elle dans le temps ?

3.1.11. Biomécanique fonctionnelle du disque

Les conclusions tirées des analyses rapportées dans ce chapitre reposent sur des observations expérimentales. Mais les forces appliquées in vivo sont très complexes.

1. Compression (fig. 37)

Chez le sujet jeune, le nucleus est suffisamment humide pour agir comme une masse gélatineuse. Quand la force est appliquée, une pression se développe à l'intérieur du nucleus qui pousse les structures environnantes en les éloignant du centre. Les plateaux vertébraux ont tendance à s'éloigner les uns des autres alors que l'annulus est repoussé vers la périphérie. La disposition des fibres permet à l'annulus d'absorber la contrainte. Si le nucleus est sec, il est incapable de produire une pression hydraulique suffisante. Les forces se répartissent plutôt sur les régions périphériques.

2. Traction

En raison de l'apparition d'une contrainte de cisaillement, le risque de rupture est plus important en traction qu'en compression. Les dimensions du disque varient différemment. Il fait saillie en compression alors qu'il se contracte en traction.

3. Flexion (fig. 38)

Une partie du disque subit une compression alors que l'autre subit une traction, chaque type s'appliquant à une moitié du disque. L'effort sur le disque est une combinaison des deux. Le côté de l'annulus sous traction se contracte alors que le côté en compression fait saillie.

4. Torsion

Il se crée des contraintes de cisaillement en plan horizontal et axial dont l'importance varie proportionnellement à la distance entre le point d'application de la force et l'axe de rotation. Les fibres annulaires, obliques par rapport au plan horizontal sont capables de résister à ces contraintes.

5. Cisaillement

Il s'exerce en plan horizontal perpendiculairement à l'axe du rachis. Ces analyses montrent comment diverses combinaisons de forces fonctionnelles créent parfois d'énormes contraintes au sein du disque. Le mécanisme de rupture résulte très certainement de la combinaison de ces forces.

3.2. BIOMECHANIQUE DES LIGAMENTS INTERVERTEBRAUX

Les ligaments sont des structures uniaxiales s'opposant à l'action des forces appliquées dans l'axe de leurs fibres. Ils résistent bien aux forces de traction. Ces ligaments, lorsque l'unité fonctionnelle (vertèbre-disque-vertèbre) est soumise à des différents vecteurs complexes de forces et de couples.

Les ligaments tout en permettant les mouvements physiologiques, maintiennent les vertèbres dans une position fixe les unes par rapport aux autres. Ils contribuent en cas de traumatisme à la protection de la moëlle épinière.

3.2.1. Les ligaments vertébraux communs antérieur et postérieur

Ils adhèrent à la fois au disque et au corps vertébral. Ils se déforment sous l'effet de la séparation relative de deux vertèbres adjacentes et également lorsque le disque fait saillie. Selon Roaf (406) (407) il n'est pas possible de rompre le ligament vertical antérieur par flexion ou extension bien que cela soit possible par rotation. Comme les disques, ces ligaments dégènèrent avec l'âge avec une diminution de leur capacité d'amortissement. Le ligament antérieur est deux fois plus résistant que le postérieur.

3.2.2. Le ligament jaune

Nachemson et Evans (381) observent que le ligament jaune est en état de pré-tension lorsque la colonne vertébrale se trouve en position neutre. Ces forces au repos diminuent avec l'âge. Le ligament est de tout l'organisme, le tissu contenant le plus fort pourcentage de fibres élastiques. Ce caractère lui permet de subir de fortes élongations.

3.2.3. Les ligaments inter et sus épineux

La torsion de ces ligaments augmente au fur et à mesure que la colonne se met en flexion. Peu d'études leur ont été consacrés.

3.2.4. Rupture du ligament - rupture de l'os

Les ligaments transfèrent des forces de traction d'un os à l'autre. Soumis à d'importantes forces, il peut y avoir rupture du ligament, de l'os, ou du point d'attache. Le site de la rupture dépend de nombreux facteurs. Selon NOYES et Coll (387), les fractures se produisent à de faibles vitesses d'impact, et les ligaments se déchirent à de grandes vitesses. On peut en conclure que la résistance de l'os augmente relativement plus que celle du ligament lorsque la vitesse d'application de la force augmente. L'immobilisation affaiblit plus la résistance de l'os que celle du ligament.

3.2.5. Biomécanique fonctionnelle des ligaments

Les ligaments antérieur et postérieur ainsi que les ligaments jaunes présentent des caractéristiques biomécaniques similaires. D'après les travaux de Nachemson et Evans (381), le ligament jaune, situé postérieurement aux axes de rotation de flexion/extension, se contracte durant l'extension de la colonne et s'étire durant sa flexion (443).

Les calculs montrent qu'en totale extension, il diminue de 10% et ne s'enfonce pas dans le canal rachidien sous l'effort de l'extension. En flexion totale, il s'allonge de 35%, c'est la plage physiologique. Une élongation supplémentaire de 20% liée à une flexion plus forte entraîne sa rupture. Des modèles mathématiques (324) essaient de comprendre le rôle joué par les ligaments et les muscles dans la biodynamique vertébrale.

3.3. BIOMECHANIQUE DE LA VERTEBRE

La première étude biodynamique du rachis de l'homme mesure la résistance vertébrale (Messerer 1880) et depuis, de nombreuses recherches ont essayé de préciser les propriétés mécaniques des vertèbres humaines et de comprendre le rôle respectif des ligaments des muscles et des os (364)(366)(368)(393)(400)(417)(430)

La forme et la position des facettes articulaires postérieures influencent l'importance des mouvements décrits par le rachis.

3.3.1. Le corps vertébral

La détermination de la résistance du corps vertébral à la compression a entraîné de nombreuses recherches la plupart motivées par la fréquence et la gravité des fractures du rachis.

Facteurs de variation de la résistance vertébrale

- 1) Niveau de la vertèbre :
Là, interviennent la taille et la morphologie de la vertèbre.
- 2) Age :
Bell et Coll (449) montrent qu'il existe une relation certaine entre la résistance et la teneur en matières minérales des tissus osseux. Ainsi, la perte de 25% du tissu osseux diminue de plus de 50% la résistance vertébrale. Le phénomène est

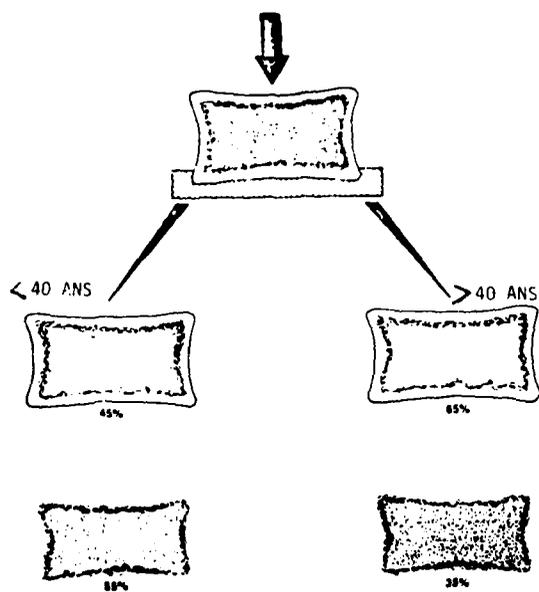


Figure 40 : Résistance relative de deux composantes du corps vertébral : la coque corticale et la partie spongieuse (d'après ROCKLOFF S.D. et BLEUSTEIN J.) (408)

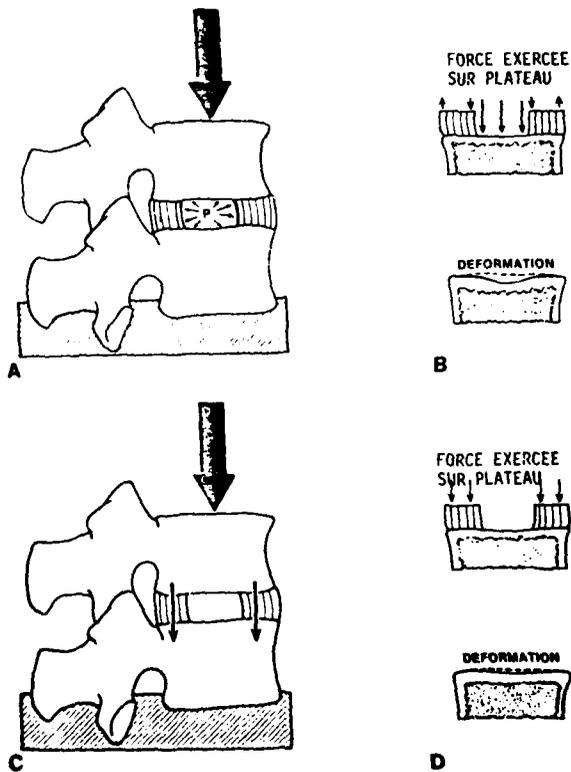


Figure 41 : Mécanisme de rupture du plateau vertébral (d'après WHITE III A.A. et PANJABI M.M.) (449)

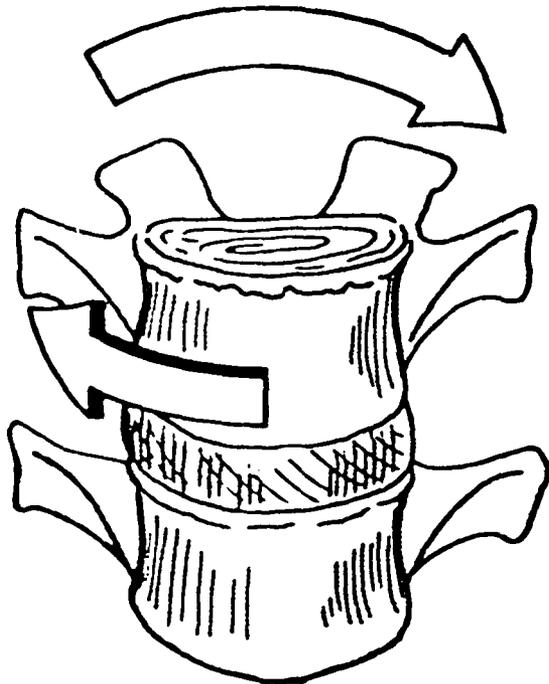


Figure 42 : Représentation d'un modèle de couplage au niveau de la colonne lombaire

- KRAG cité d'après (449)

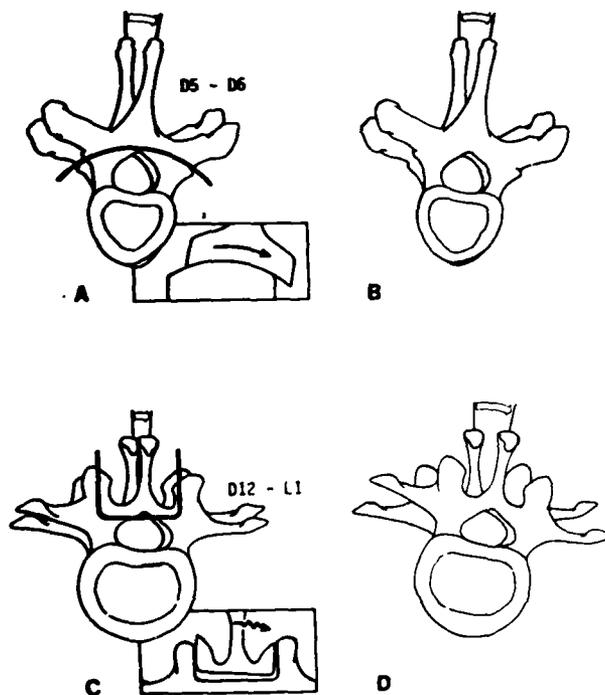


Figure 43 : Rôle des facettes articulaires d'après WHITE III A.A. et PANJABI M.M. (449).

- a) La rotation axiale d'une vertèbre de l'unité D5-D6 par rapport à une autre n'est pas gênée par la facette articulaire, du fait de l'orientation du plan des facettes par rapport à l'axe instantané de rotation. Une certaine rotation axiale est produite par un couple donné.
- b) La suppression des facettes ne modifie pas significativement la résistance à la rotation axiale de l'unité D5-D6. Une rotation à peu près égale se produit pour le même couple que dans a).
- c) La situation se présente très différemment pour une unité fonctionnelle dans laquelle l'articulation s'oriente de sorte que les deux facettes empiètent l'une sur l'autre lorsque cette unité subit une torsion axiale. Un exemple de ce type d'unité est fourni par D12-L1 qui est apparue être plus résistante à la rotation que toute autre unité. Pour un couple identique à celui de a). La rotation est donc plus faible.
- d) La suppression des facettes de la charnière D12-L1 libère le mouvement et modifie significativement la résistance à la rotation axiale. La rotation est beaucoup plus grande pour le même couple que celui de a).

lié à la disparition des travées osseuses dans le corps vertébral (fig 39).

3) Facteurs topographiques et tissulaires

Le corps vertébral reçoit la plus grande partie des forces de compression agissant sur le rachis. Cette force se transmet du plateau supérieur au plateau inférieur par deux milieux : la coque corticale et le noyau spongieux (zone criblée). Rockoff et Coll (408) démontrent expérimentalement que jusque l'âge de 40 ans, 55% de la force sont supportés par la zone criblée et seulement 45% pour la coque corticale. Après 40 ans, cette zone criblée n'en supporte plus que 35% et la coque 65% (fig 40). Cette zone criblée subit d'importantes déformations à la compression atteignant 9,5% avant d'arriver à la rupture. La déformation pour une force identique pour l'os cortical est inférieur à 2%.

Rôle de la moëlle osseuse

Lindhal (365) puis Hayes et Carter (333) démontrent que le mécanisme amortisseur de l'os trabéculaire est renforcé par la présence de la moëlle rouge, notamment dans les impacts à grande vitesse. La moëlle oppose donc un coussin hydraulique et le tissu spongieux aux grandes vitesses d'impact devient ainsi la principale composante de la résistance.

Rupture des plateaux vertébraux (fig 41)

En 1957, Perry (395,396) explique l'apparition de la rupture des plateaux vertébraux sous l'effet d'une compression. La compression d'un disque non dégénéré fait augmenter la pression à l'intérieur du nucleus provoquant ainsi une compression au centre du plateau. Cette force appliquée au plateau entraîne sa déformation puis une fracture centrale et une hernie intraspongieuse. Dans un disque dégénéré, le nucleus non gélatineux n'est pas capable de créer une pression hydraulique importante. La force de compression est essentiellement transmise d'un plateau à l'autre par l'annulus. Le plateau subit une force importante à sa périphérie. Les contraintes se répartissent harmonieusement sur son pourtour. Il apparaît alors une fracture du corps vertébral.

3.3.2. L'arc neural (315)(334)(383)(449)

Expérimentalement l'arc neural a toujours été considéré comme une unité individuelle. La résistance ne varie pas avec l'état du disque. Elle diminue toutefois en fonction de l'âge. Nachemson (383) par ses mesures de pression intradiscale (et partant des forces s'exerçant sur le disque) a conclu que les facettes articulaires subissent environ 18% de la force totale de compression s'exerçant sur une unité fonctionnelle. King et Coll (449) ont effectué des études dynamiques sur cadavres entiers. Ils concluent que la répartition de la contrainte entre les facettes et le disque est assez complexe selon la position de la colonne vertébrale les facettes peuvent subir de 33 à 0% de la force totale appliquée. White (449) et Hirsch (334) ont montré que les facettes articulaires et le complexe ligamentaire postérieur limitent les mouvements physiologiques du rachis. Le massif postérieur joue donc un rôle dans la stabilité de la colonne vertébrale, notamment si le disque est déjà rompu.

3.3.3. Biomécanique fonctionnelle de la vertèbre

Ainsi que l'ont observé Perry (395) et Bell (449) l'âge entraîne un affaiblissement de la colonne vertébrale, et ce, beaucoup plus que l'ostéoporose ne le laisserait prévoir. Ce fait serait dû à la raréfaction des travées horizontales au centre de la vertèbre avant 50 ans, diminuant notablement la résistance, principalement au centre de la vertèbre. Ce principe concorde bien avec les observations cliniques d'effondrement central du corps vertébral chez les patients souffrant d'ostéoporose.

3.4. BIOMECHANIQUE DE LA COLONNE VERTEBRALE (346)(377)(449)

L'unité vertèbre fonctionnelle est le plus petit segment de colonne qui présente des caractéristiques biomécaniques analogues à celles de la colonne toute entière. Le comportement global de la colonne est alors la résultante des comportements des unités individuelles. Les modèles mathématiques permettent d'établir la relation entre les propriétés physiques fondamentales des composantes individuelles d'une structure et la structure elle-même mais l'interprétation biologique reste difficile d'autant plus grande que le modèle intéresse de multiples unités fonctionnelles.

La rigidité est la propriété permettant à une substance de résister à une force imposée. Le coefficient de rigidité est le rapport entre la force appliquée et le déplacement qu'elle provoque.

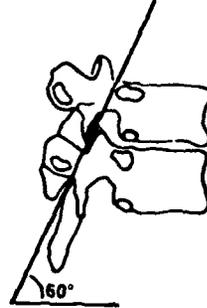
La souplesse est la capacité d'une structure de se déformer sous l'application d'une force. Le coefficient de souplesse est donc le rapport entre le déplacement effectué et la force appliquée. Il est l'inverse du coefficient de rigidité.

La grande majorité des études de rigidité vertébrale ont été conduites en compression. Les expériences ont montré que les unités fonctionnelles des régions dorsale

VERTEBRES CERVICALES



VERTEBRES DORSALES



VERTEBRES LOMBAIRES

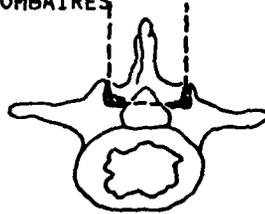


Figure 44 : Orientation caractéristique des facettes articulaires dans les régions cervicale, dorsale et lombaire (d'après 449)

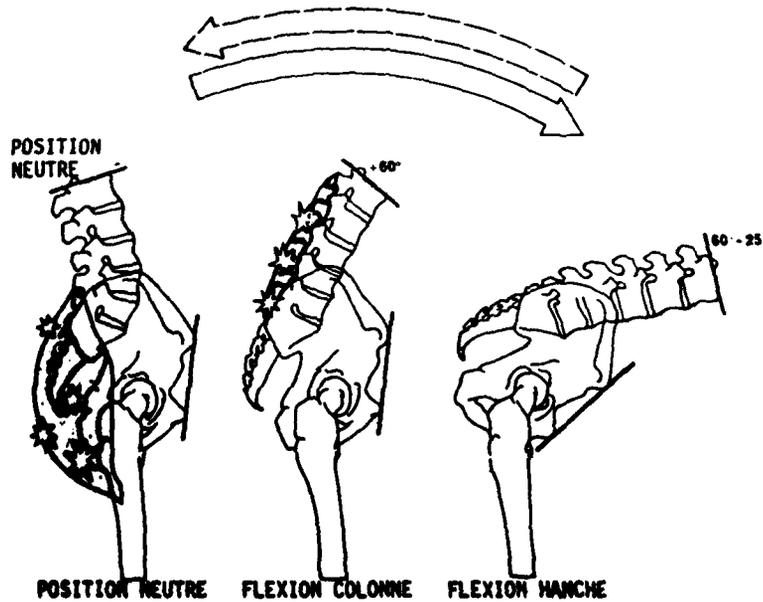


Figure 45 : (d'après 449) Activité musculaire et antéflexion. L'antéflexion est un mouvement en deux temps sollicitant à la fois le rachis et le pelvis.

et lombaire sont plus rigides en compression qu'en tension. La colonne se raidit sous les forces importantes ainsi que le montrent les études de Hirsch, Nachemson (381)(384) et Rolander (409).

La résistance au cisaillement, dans la région lombaire semble égale dans toutes les directions, antéro postérieure et latérale.

En flexion, la colonne semble plus souple (ou moins rigide) qu'en extension. Les éléments postérieurs interviennent pour résister à l'extension. Ces propriétés ne se modifient pas selon le niveau (410).

La rotation axiale est sûrement le mouvement le plus dangereux pour le disque. La résistance à la torsion est plus ou moins constante dans l'ensemble de la région dorsale pour augmenter au niveau lombaire. L'ablation des éléments postérieurs augmente la liberté de rotation. Selon Gregersen et Lucas (325) la rotation moyenne cumulée, in vivo, serait de 102° entre la première vertèbre dorsale et le sacrum.

En pratique, les mouvements physiologiques sont étroitement liés par un phénomène de couplage dû à la géométrie des vertèbres, aux ligaments et à la courbure de la colonne vertébrale (fig. 42).

Ce phénomène de couplage a fait l'objet de nombreuses expériences. Il est plus fréquent au niveau cervical et lombaire qu'au niveau dorsal. On dit que 2 mouvements et plus constituent un couple (par ex, flexion latérale et rotation) lorsqu'il n'est pas possible d'en produire un sans produire l'autre en même temps. Il existe dans la région dorsale un fort couplage entre les mouvements s'effectuant en plan sagittal (translation et rotation). Le couplage rotation-axiale-flexion latérale est le plus fort dans la région lombaire (449)

Le rachis est assujéti aux précontraintes physiologiques en particulier celles liées à la position du corps. Au niveau L3 L4, elles doublent, en particulier, le poids du corps d'un individu debout. Les précontraintes se répercutent fortement sur certains valeurs de rigidité. Les vraies propriétés de rigidité et de souplesse de la colonne vertébrale devraient être mesurées sous un effet de précontraintes convenablement choisi, de sorte à simuler les conditions existantes " in vivo ". In situ la précontrainte physiologique s'exerce sous forme de poussée axiale liée au poids du corps et sous forme d'une flexion, ces précontraintes de flexion sont contrebalancées par les ligaments et muscles postérieurs.

Rôle des facettes articulaires (315)(346)(449)

La résistance à la torsion est en grande partie déterminée par la forme des facettes articulaires. Si le plan des facettes permet une rotation pratiquement libre (par ex D5 D6) l'unité fonctionnelle résiste peu à l'effort de rotation, seuls les ligaments limitent la souplesse. Par contre, l'unité D12 L1 a des facettes qui gênent réellement la rotation axiale. Ces facettes augmentent donc considérablement la rigidité. C'est en effet au niveau de la charnière dorso-lombaire que siègent le plus souvent les fractures. La rigidité anormalement forte de cette structure résulte de l'orientation particulière des facettes articulaires (fig 43 et 44).

3.5. ROLE DE LA CAGE THORACIQUE ET DE LA MUSCULATURE

La cage thoracique raidit et renforce la colonne. L'articulation costo vertébrale offre des structures ligamentaires supplémentaires qui contribuent à la rigidité vertébrale et le thorax offre un moment d'inertie augmentant la capacité d'absorption énergétique du rachis dorsal.

Même munie de ligaments intacts, une colonne vertébrale privée de muscles devient une structure extrêmement instable. Les muscles permettent au tronc de se stabiliser et d'effectuer les mouvements physiologiques. Ils se subdivisent en muscles post et latéro vertébraux et en muscles pré vertébraux qui sont en fait, les muscles abdominaux. Morris et Coll (377) ont observé que les muscles dorsaux sont en activité constante chez le sujet debout. L'antéflexion est un mouvement en 2 temps. Durant le premier (60° en moyenne) la flexion résulte des unités fonctionnelles lombaires puis la seconde (25°) résulte du mouvement des articulations coxo fémorales. Le mouvement de flexion, dû au poids du tronc est compensée, à mesure qu'il s'accroît, par l'augmentation correspondante de l'activité des muscles spinaux et des muscles superficiels du dos. Les muscles se relâchent lorsque l'hyperflexion est atteinte (fig 45).

En extension, l'activité des muscles du dos est accrue alors qu'en flexion latérale, l'activité musculaire est relativement plus forte dans la partie antéro latérale de la région lombaire et dans la partie homolatérale de la région dorsale.

Ce sont les muscles spinaux et rotateurs qui impriment une rotation axiale. Les muscles abdominaux sont assez peu actifs. Il apparait donc que le rachis peut être souple ou rigide et supporte des charges extrêmement fortes. La souplesse et la stabilité intrinsèque sont assurés par les disques et les ligaments intervertébraux alors que le tronc et la musculature du dos assurent la stabilité extrinsèque.

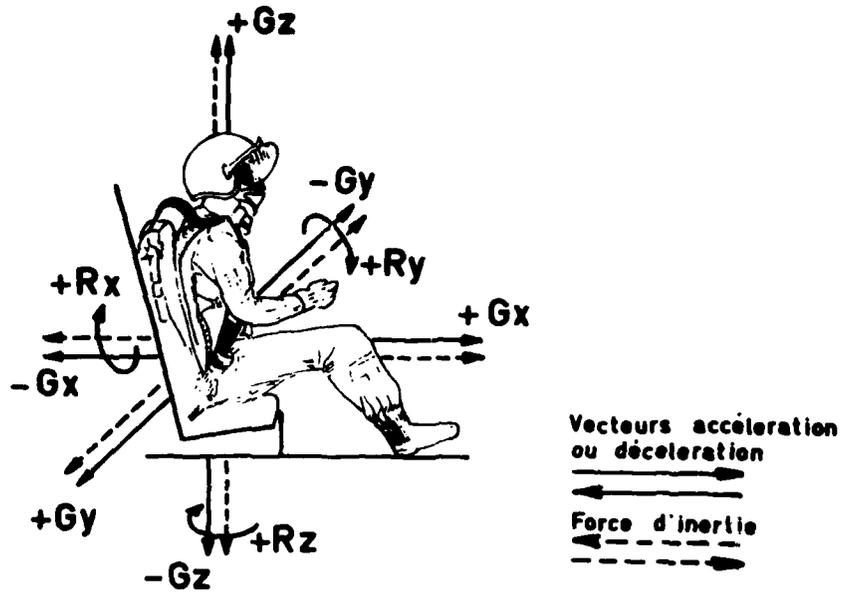


Figure 46 : Classification des accélérations en fonction des axes du corps humain.

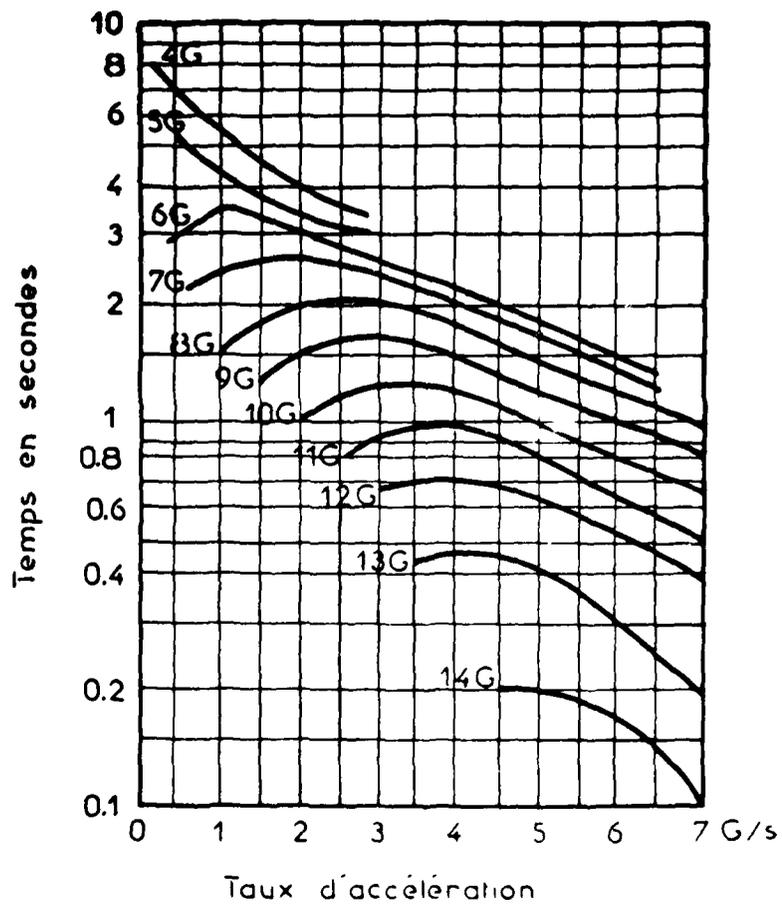


Figure 47 : Temps de tolérance en fonction du nombre de jolts pour différentes valeurs d'accélération + Gz.

CHAPITRE 4 : LES FACTEURS D'AGRESSION EN VOL POUR

LE RACHIS

R. AUFFRET, H. VIEILLEFONT

S O M M A I R E

4.1. LES FACTEURS INHERENTS AU VOL

4.1.1. Les accélérations

4.1.2. Les vibrations

4.2. LES FACTEURS ACCIDENTELS

4.2.1. Les éjections

4.2.2. Les crashes

Les facteurs d'agression en vol sont multiples et peuvent se diviser en deux catégories :

- les facteurs habituels et inhérents au vol , il s'agit des vibrations et des accélérations de longue durée;
- les facteurs accidentels comme l'éjection ou le crash qui soumettent le squelette du pilote à des forces considérables appliquées pendant une très courte durée.

4.1. LES FACTEURS INHERENTS AU VOL

4.1.1. Les accélérations :

Les avions modernes et les avions de combat, en particulier, sont caractérisés par leur maniabilité et par leur vitesse. Tant qu'elle reste constante en grandeur et en direction, la vitesse n'exerce, par elle même, aucun effet physiopathologique sur l'organisme humain. Par contre, la maniabilité de l'avion suppose de brusques variations dans le temps du vecteur vitesse tant en module qu'en direction. Ces variations sont appelées accélérations. En termes de mathématique, l'accélération est la dérivée de la vitesse par rapport au temps et s'exprime par conséquent en mètre par seconde par seconde (m/s²). Toutefois, en pratique courante , on utilise le nombre de G - 1 G étant la valeur de l'accélération de la pesanteur à Paris, soit 9,8097 m/s².

D'après ce qui vient d'être dit, on est amené à distinguer :

- des accélérations linéaires définies par la seule variation du module du vecteur vitesse. C'est le cas du décollage ou de l'atterrissage.
- des accélérations radiales définies par la seule variation en direction du vecteur vitesse. C'est le cas d'un virage.
- des accélérationns angulaires où il existe à la fois une variation en grandeur et en direction du vecteur vitesse,

Elles sont très fréquentes lors des vrilles, du vol en atmosphère turbulente, au cours des figures de voltige, dans les pertes de contrôle avion.

Très souvent en aéronautique, les accélérations s'appliquent simultanément à un mobile soumis à plusieurs forces. On les appelle accélérations composites . C'est le cas de l'éjection où l'accélération fournie par le canon du siège se compose avec la rotation de celui-ci et avec le freinage aérodynamique.

C'est aussi le cas des accélérations dites de Coriolis. Elles résultent de la combinaison d'une accélération linéaire et d'une accélération angulaire. Elles n'ont pas d'influence sur le rachis mais elles sont génératrices d'illusions sensorielles qui peuvent être à l'origine de perte de contrôle de l'avion.

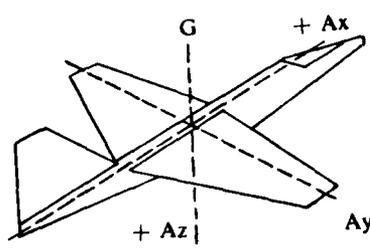
En ce qui concerne les effets physiopathologiques des accélérations et par conséquent la tolérance humaine à leur encontre, trois facteurs physiques doivent être

pris en compte :

- L'axe d'application des forces,
- L'intensité de l'accélération,
- Les temps d'application des accélérations et leur temps d'établissement ou leur brusquerie.

Au plan physiologique ce sont les forces d'inertie qui sont à considérer car elles sont responsables des troubles. Elles sont égales mais de sens contraire aux forces délivrées par l'accélération de l'avion. Ces forces s'appliquent par rapport à un système d'axe dans lequel est placé le pilote assis sur le siège de son avion (fig.46)

Le tableau 4-1 montre la correspondance des axes avion et pilote et le sens d'application des forces d'inertie d'après la classification de l' AGARD.



	Accélération avion	Accélération physiologique	Force d'inertie
vers l'avant	+ Ax	+ Gx	vers l'arrière
vers l'arrière	- Ax	- Gx	vers l'avant
vers le haut	- Az	+ Gz	vers le bas
vers le bas	+ Az	- Gz	vers le haut
vers la droite	+ Ay	+ Gy	vers la gauche
vers la gauche	- Ay	- Gy	vers la droite

TABLEAU 4-1

On remarquera que le Z avion et pilote sont de signes opposés. Les accélérations + Gz engendrent une force d'inertie dans le sens tête siège qui tend à enfoncer le pilote dans son siège et à " tasser " la colonne vertébrale.

Il est à peu près certain que les micro-traumatismes répétés, liés aux accélérations, interviennent dans la détérioration de l'axe vertébral. Des études expérimentales chez l'animal soumis à des accélérations + Gz de longue durée (plusieurs heures) mettent en évidence une détérioration du surtout périodiscologique lésion pouvant, dans une certaine mesure expliquer l'apparition de phénomènes douloureux au niveau du rachis puis d'arthroses. Il faut remarquer que c'est souvent à l'occasion d'exercice de voltige qu'apparaissent les premières douleurs dorsales ou lombaires d'une arthrose vertébrale jusqu'ici latente. Les accélérations atteignent des niveaux importants en aéronautique au cours de certaines manoeuvres : virages serrés, ressources en fin de piqués, combat.

Au cours de ces accélérations + Gz, la force d'inertie s'exerce aussi sur la colonne hydrostatique que représentent les gros vaisseaux sanguins. Ces effets sont primordiaux. Ils tendent à diminuer la perfusion des territoires supérieurs cérébraux en particulier, d'où les troubles visuels apparaissant vers 4 G et les risques de perte de conscience vers 5 à 6 G et tendent à augmenter la stase sanguine dans le petit bassin et les membres inférieurs.

Les accélérations transverses + Gx apparaissent, en aéronautique lors des catapultages ou des apontages sur porte avion ou lors de certaines virilles des avions modernes. En astronautique elles sont présentes au départ de la fusée et lors de la rentrée du vaisseau spatial dans l'atmosphère. Elles s'exercent perpendiculairement à l'axe vertébral et sont par conséquent beaucoup mieux supportées que les précédentes.

On peut retenir que la tolérance de l'organisme vis à vis des accélérations est inversement proportionnelle à leur intensité, à la durée de leur application et à leur brusquerie.

Ce dernier terme rend compte de la vitesse d'établissement de l'accélération. C'est le jolt des auteurs anglo-saxons. Il s'agit de la dérivée de l'accélération ou de la dérivée seconde de la vitesse par rapport au temps.

Cette notion est importante à prendre en considération dans l'étude des effets physiopathologiques des accélérations très intenses (fig 47).

Les figures 48 à 51 précisent les tolérances aux divers types d'accélérations habituelles en aéronautique. Leur intensité est en général modérée mais leur durée d'application est longue, supérieure à la seconde.

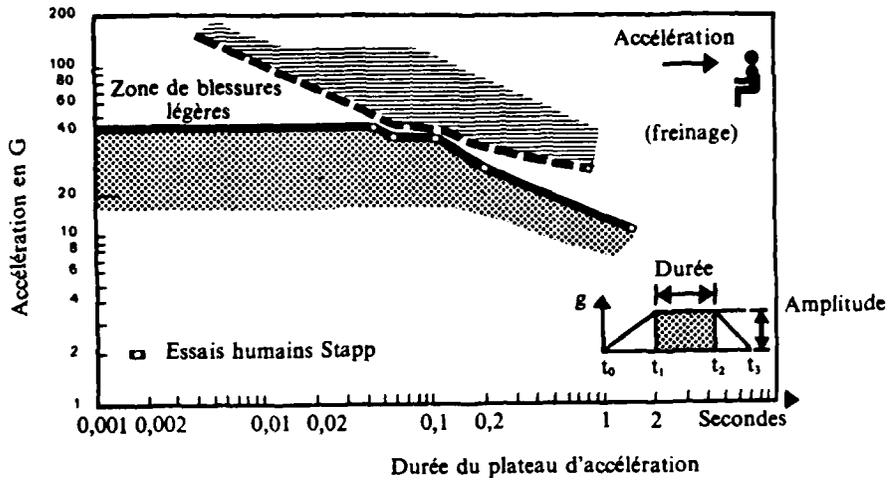


Figure 48 : Tolérance aux accélérations G_x - d'après STAPP J.P. (233)

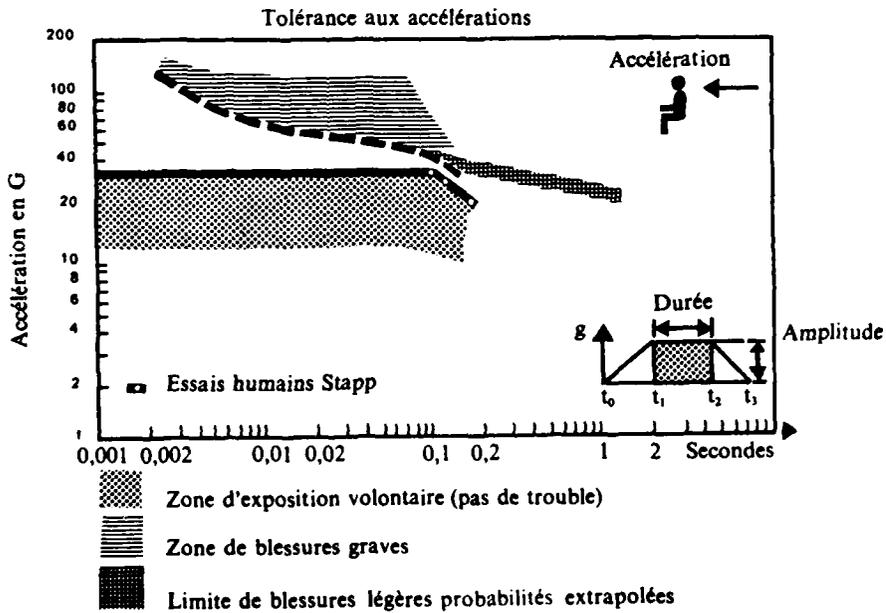


Figure 49 : Tolérance aux accélérations G_x + d'après STAPP J.P. (233)

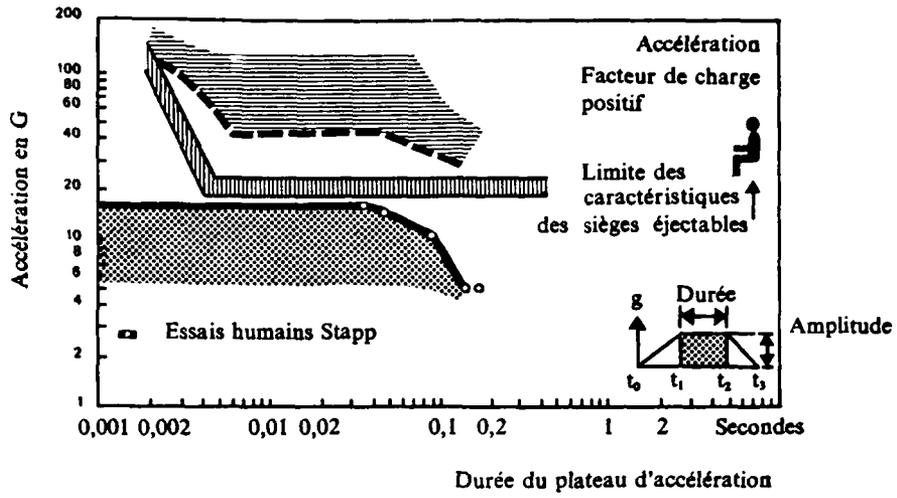


Figure 50 : Tolérance aux accélérations Gz +
d'après J.P.STAPP (233)

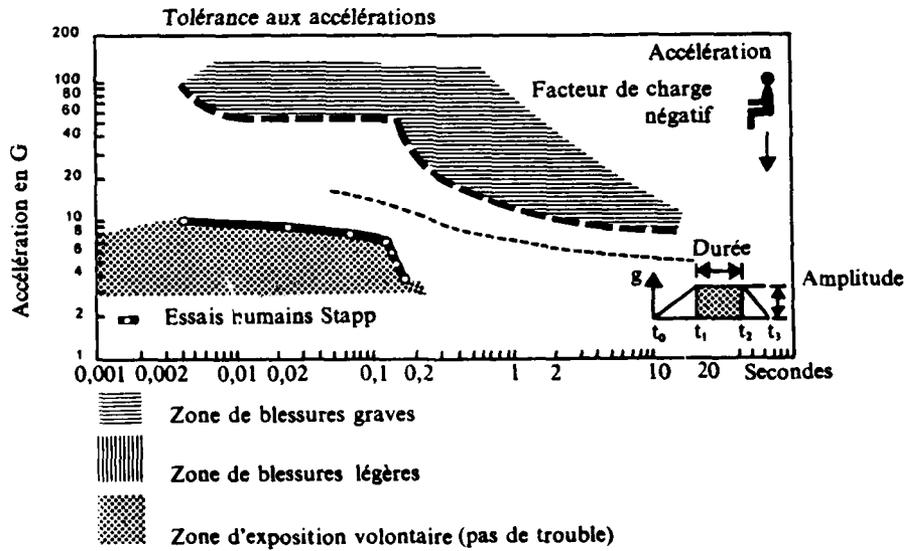


Figure 51 : Tolérance aux accélérations Gz -
d'après J.P. STAPP (233)

4.1.2. Les vibrations

On appelle vibration, une série de déplacements d'une masse de part et d'autre de sa position d'équilibre. Ces déplacements sont bien entendu caractérisés par leur fréquence, leur amplitude et leur vitesse ou mieux leur accélération.

En aéronautique, il s'agit de vibrations forcées où une force extérieure entretient le mouvement. Elles sont soit mécaniques et ont pour origine, le moteur, le réacteur ou le rotor des hélicoptères, leur fréquence est élevée, soit aérodynamique et sont liées à l'écoulement de l'air sur les surfaces de l'aéronef. Elles sont particulièrement intenses lors du vol dans les turbulences. Leur fréquence est comprise entre 2 et 20 Hz.

Des phénomènes vibratoires de fréquence voisine d'1 Hz connus sous le nom de pompages peuvent apparaître sur les avions de combat à des vitesses égales ou supérieures à 500 noeuds. Ils peuvent entraîner des fractures du rachis dorsal ou des hernies discales lombaires. Les vibrations constituent par conséquent en aéronautique un facteur d'agression constant, difficile à éliminer et particulièrement nocif.

Le corps humain présente deux bandes de résonance principales :

- aux environs de 5 Hz correspondant à la ceinture scapulaire et au système thoraco-abdominal, y compris les viscères.
- aux environs de 11 Hz correspondant à une compression axiale du corps entre le siège et la tête.

On assiste pour ces fréquences à des phénomènes d'amplification de l'énergie fournie par les vibrations et c'est dans cette bande de fréquence que la tolérance est la plus basse. Malheureusement, c'est aussi dans ces fréquences que se trouvent la majorité des vibrations en aéronautique et sur les hélicoptères notamment.

Il est actuellement bien établi que l'exposition prolongée et répétée à des vibrations d'amplitude même faibles, entraîne des lésions osseuses et articulaires siégeant préférentiellement sur la colonne lombaire.

Il existe deux fois plus de troubles de la mobilité du rachis chez les pilotes d'hélicoptères que dans la population normale. Ce fait est très vraisemblablement dû à l'addition des micro-traumatismes dus aux vibrations et à la position asymétrique du pilote par rapport à ses commandes, entraînant une inefficacité du hauban musculaire paravertébral.

En ce qui concerne la tolérance (voir figures 52 et 53) on doit distinguer une tolérance de confort surtout importante parce que l'inconfort influe à la longue sur les performances humaines et une tolérance au point de vue de l'apparition des lésions. Le facteur temps est dans ce dernier cas très important puisque des accélérations de 2 à 3 G sont acceptées quelques minutes, mais pendant 24 H, seuls quelques centièmes de G sont tolérés.

Pour les vibrations + Gz la tolérance du sujet assis ou debout, la plus basse est située entre 4 et 8 Hz. Au-dessous de 4 Hz la tolérance est proportionnelle à 1/f et de 8 à 100 Hz elle est proportionnelle à f.

4.2. LES FACTEURS ACCIDENTELS

Ils sont à l'origine d'accélérations très intenses dont la durée d'application est toujours très brève (inférieure à 0,2 s), on les appelle des impacts.

La caractéristique principale de ces accélérations est de ne pas provoquer de troubles des régulations physiologiques car leur durée est trop brève, mais des effets mécaniques. Ceux-ci peuvent être fatals immédiatement ou après un certain délai ou présentant les caractères d'une lésion évoluant vers la guérison (contusions, hématomes, fractures, luxations).

L'intensité de ces accélérations étant toujours élevée, le temps d'application et le temps d'établissement (le jolt) ont une importance toute particulière.

Etant donné l'existence de deux bandes de résonance du corps humain (voir paragraphe 4.1.2.) on peut prévoir que la transmission des forces dans le corps sera amorti pour les accélérations très brèves (inférieures à 0,01 s) alors qu'il y aura transmission avec des phénomènes d'amplification des accélérations pour des durées supérieures.

De même, si le temps de montée en accélération est court par rapport aux périodes naturelles du corps (jolt élevé) on pourra assister à des phénomènes d'overshoot importants.

Tout ce qui vient d'être dit du corps humain est vrai des matériaux qui séparent le pilote de la structure de l'avion.

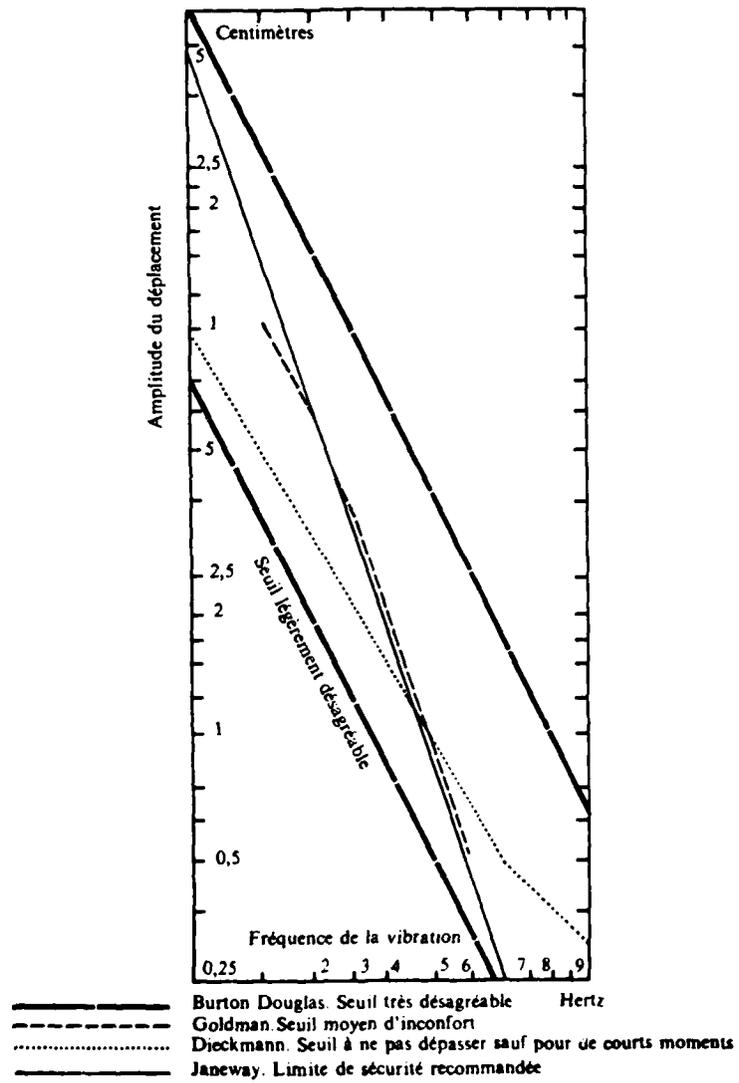


Figure 52 : Courbes de tolérance subjective pour les vibrations sinusoïdales verticales.

Un coussin mal choisi pourra transformer une accélération supportable en une accélération dangereuse dans le cas d'un siège éjectable.

Enfin, il est important de tenir compte de la surface sur laquelle les forces d'inertie agissent. Les effets seront d'autant moins graves que la surface corporelle sur laquelle la force est répartie est plus grande.

4.2.1. Les éjections :

L'abandon en vol des avions de combat se déplaçant à grande vitesse n'est possible qu'avec l'usage d'un siège éjectable.

L'éjection nécessite la mise en oeuvre d'une force importante responsable d'accélération + Gz de haute intensité (supérieure à 15 G) mais dont la durée d'application est très courte (comprise entre 0,2 et 0,5 s).

La force s'exerce d'abord selon l'axe longitudinal du corps, puis devient complexe par suite des évolutions du siège dans sa course et de son freinage.

Il ne faut pas oublier qu'après la séparation du siège et du pilote, ce dernier se trouve transformé en parachutiste. Il sera donc soumis :

- au choc à l'ouverture du parachute (8 à 10 G pendant 1 seconde pour un saut de 15.000 ft)
- au traumatisme possible à l'arrivée au sol d'autant plus fréquent que le pilote n'est pas beaucoup entraîné au parachutisme. Dans les meilleures conditions, aussi bien de jour que de nuit, à l'impact au sol, la décélération subie pendant 0,1 à 0,4 seconde est de l'ordre de 2 à 5 G.

Malgré la fiabilité apportée par les perfectionnements successifs et l'automatisme des différentes séquences, l'éjection crée un risque majeur au niveau du rachis dorsal et les lésions traumatiques sont fréquentes.

4.2.2. Les crashes :

Au cours de l'atterrissage de fortune hors des pistes aménagées, le pilote subit des décélérations complexes d'une intensité extrêmement élevée (100 G par exemple). Cependant la durée de cette décélération est très faible et se chiffre en millisecondes, c'est pourquoi des accélérations très élevées peuvent être endurées.

C'est ainsi que l'on connaît des cas de survie après des chutes accidentelles au cours desquelles les accélérations - Gx avaient atteint entre 150 et 250 G pendant environ 0,01 s.

Cependant la figure 49 montre qu'il existe un écart important entre la zone des blessures graves et la zone d'exposition volontaire sans apparition de lésion (45 G) et il est difficile de prévoir où passe exactement la courbe de tolérance.

Il reste évident que les valeurs de tolérance mentionnées ne sont applicables qu'à des sujets parfaitement maintenus sur leur siège par un harnais de contention adéquat.

En résumé, le rachis du pilote est soumis à deux types d'agression :

Les premières sont inhérentes au vol, elles sont d'intensité relativement faible et leurs effets s'observent avec le temps. Il s'agit d'un problème de fatigue des matériaux.

Les secondes sont exceptionnelles mais d'intensité très élevées, elles mettent en cause la résistance mécanique de la colonne vertébrale et peuvent entraîner des fractures. Il s'agit d'un problème de résistance des matériaux.

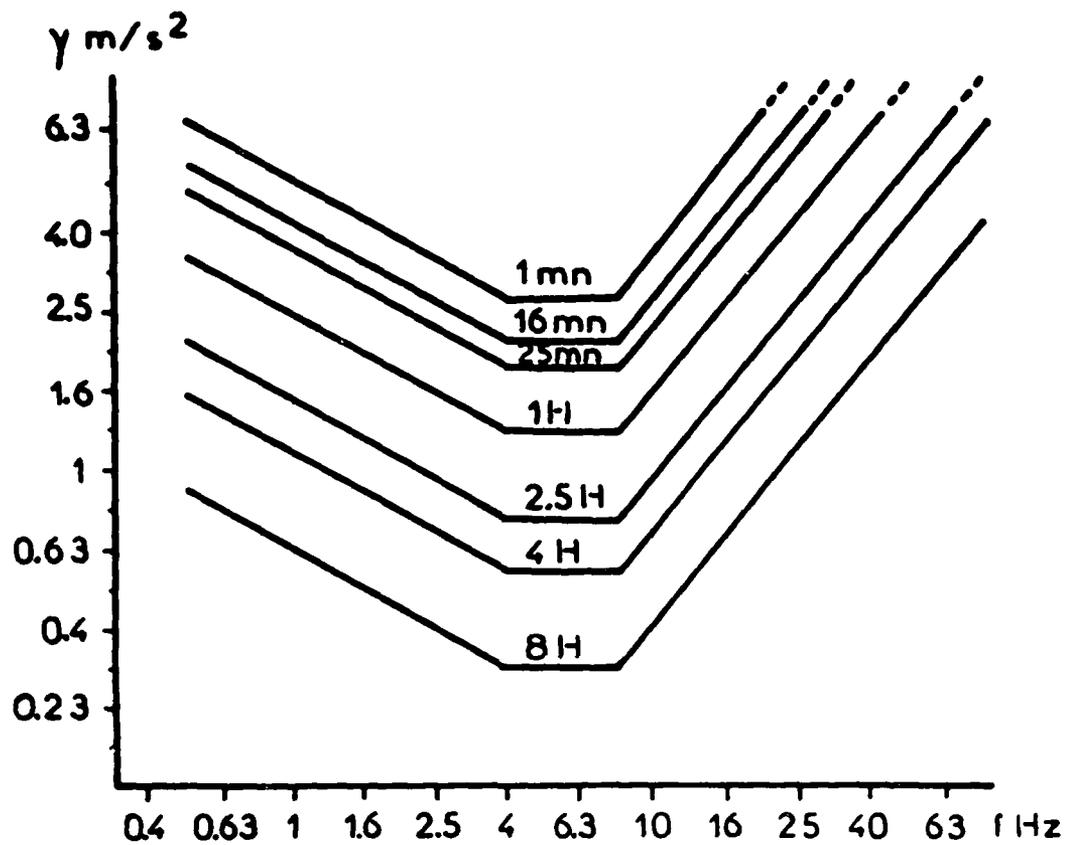


Figure 53 : Tolérance aux vibrations sinusoïdales

Il s'agit de la tolérance correspondant à l'apparition de la fatigue et à la diminution du rendement psychomoteur.

Pour obtenir la tolérance "limite d'exposition", multiplier les valeurs par 2 (+ 6dB).

Pour obtenir la tolérance "diminution du confort", diviser les valeurs par 3,15 (- 10 dB).

CHAPITRE 5 : LES LESIONS TRAUMATIQUES DU RACHIS

EN MEDECINE AEROSPATIALE
-----S O M M A I R E

- 5.1. INTRODUCTION
- 5.2. LES THEORIES PATHOGENIQUES DES FRACTURES DU RACHIS
- 5.3. ETIOPATHOGENIE
 - 5.3.1. Le crash
 - Avions légers
 - Planeurs
 - Avions lourds
 - 5.3.2. Les accidents d'hélicoptères
 - 5.3.3. L'éjection des pilotes d'avions de combat
 - 5.3.4. Parachutisme
 - Militaire
 - Civil
 - Les ailes volantes
 - 5.3.5. Les accidents en vol
 - Phénomènes vibratoires rapides (les pompages)
 - Autres accidents
 - 5.3.6. Les centrifugeuses et traineaux d'accélération
- 5.4. EXAMEN CLINIQUE
- 5.5. RADIOLOGIE
- 5.6. LES SEQUELLES

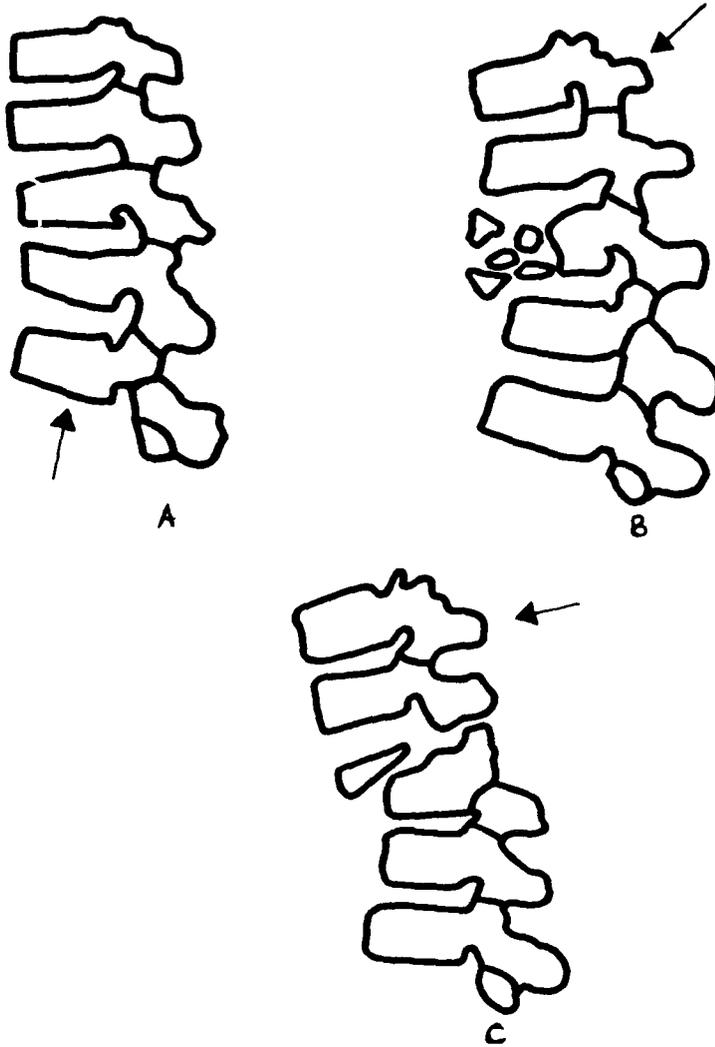


Figure 54 : Mécanisme des fractures du rachis dorso-lombaire
d'après WATSON-JONES (448)

5.1. INTRODUCTION

R.P. DELAHAYE

Les affections traumatiques du rachis en médecine aéronautique, leurs séquelles par leur fréquence, leur diversité, par les problèmes étiopathogéniques, cliniques, radiologiques, thérapeutiques, médico-légaux, dominent toute la pathologie vertébrale de l'aviateur, du parachutiste.

Beaucoup de lésions traumatiques apparaissent lorsque l'avion est en détresse. Il existe diverses modalités de sauvetage.

La première, commune à la plupart des appareils, est le crash ou atterrissage forcé " en catastrophe " (avions légers de tourisme, planeurs, avions commerciaux de transport de passagers, quelques appareils militaires).

La seconde est le parachutage.

Dans l'avion à hélice généralement endommagé, le pilote évacué, si la vitesse avion n'est pas importante, la cabine par ses propres moyens. Par contre, dans l'aviation de combat employant des avions à réaction bisonique à aile delta, les vitesses élevées nécessitent l'emploi d'un siège éjectable pour abandonner l'avion.

Depuis 1970, dans plusieurs aviations de chasse ont été décrits des phénomènes vibratoires rapides apparaissant sur des avions de combat à grande vitesse et des fractures du rachis ont été diagnostiquées.

Le parachutisme d'abord réservé aux militaires est devenu en 1980 un véritable sport avec ses milliers de participants qui se sont passionnés à deux techniques : l'atterrissage de précision sur cible et les acrobaties en vol. Récemment, les vols groupés de parachutistes (vol relatif) font apparaître une nouvelle étiologie de lésions traumatiques : les collisions en vol.

Après un rappel des théories pathogéniques tendant à expliquer les différents types de fractures du rachis en médecine aéronautique, nous étudierons les différentes circonstances étiologiques dans lesquelles surviennent les lésions traumatiques (crash, parachutisme, éjection, accidents en vol, accidents sur centrifugeuses, traîneaux) Nous envisagerons ensuite l'étude clinique en rappelant les modalités pratiques de cet examen si souvent négligé. La radiologie doit être réalisée précocement avec une technique parfaite permettant d'obtenir des documents radiographiques facilitant, avec la clinique, l'établissement d'un inventaire précis des lésions. Les séquelles traumatiques, nombreuses, méritent un exposé détaillé car elles créent une symptomatologie clinique et radiologique très particulière que tout médecin de l'air doit parfaitement connaître.

5.2. THEORIES ETIOLOGIQUES DES FRACTURES DU RACHIS

R.P. DELAHAYE et P.J. METGES

Nous distinguerons les fractures du rachis dorso-lombaire et celles du rachis cervical.

5.2.1. Mécanisme physiopathogénique des fractures du rachis dorso-lombaire

Les travaux de WATSON-JONES (448) et NICOLL (380) ont permis une meilleure compréhension du mécanisme physiopathogénique des fractures du rachis. WATSON envisage schématiquement trois directions principales des forces. A chacune correspond à l'étage dorso-lombaire, un aspect anatomopathologique particulier.

5.2.1.1. La compression verticale du rachis s'exerce sur une colonne normale ou pouvant être plus ou moins raidie par une contraction réflexe : sujet tombant d'une certaine hauteur et atterrissant soit sur les pieds, soit sur les fesses par exemple, sujet assis correctement sanglé chutant verticalement (pilote hélicoptère en autorotation par ex.). La compression détermine un tassement cunéiforme antérieur à l'endroit de moindre résistance du corps vertébral (zone vasculaire). Le mur postérieur (voir plus loin chapitre 5.5.) est respecté, les disques et les ligaments inter-épineux épargnés (fig. 54 a). La flexion latérale du tronc (Nicoll) sur un sujet debout ou assis crée un tassement vertébral asymétrique prépondérant du côté de la flexion.

5.2.1.2. La force agit brutalement de haut en bas et d'arrière en avant (fig. 54 b).

Le rachis se place en hyperflexion stricte ou légèrement latéralisée. L'angulation devient si importante que le bord antérieur et inférieur de la vertèbre sous jacente s'enfonce en coin dans le plateau vertébral supérieur de la vertèbre sous jacente. Le coin antérieur le plus souvent se détache. Le disque intervertébral est déchiré, parfois détruit. Les ligaments inter-épineux sont souvent rompus.

Ce mécanisme se rencontre à l'état pur au cours des crashes mais s'observe au cours d'atterrissages difficiles. Exceptionnellement, dans la phase dynamique d'éjections à grande vitesse, cette hyperflexion a pu être discutée.

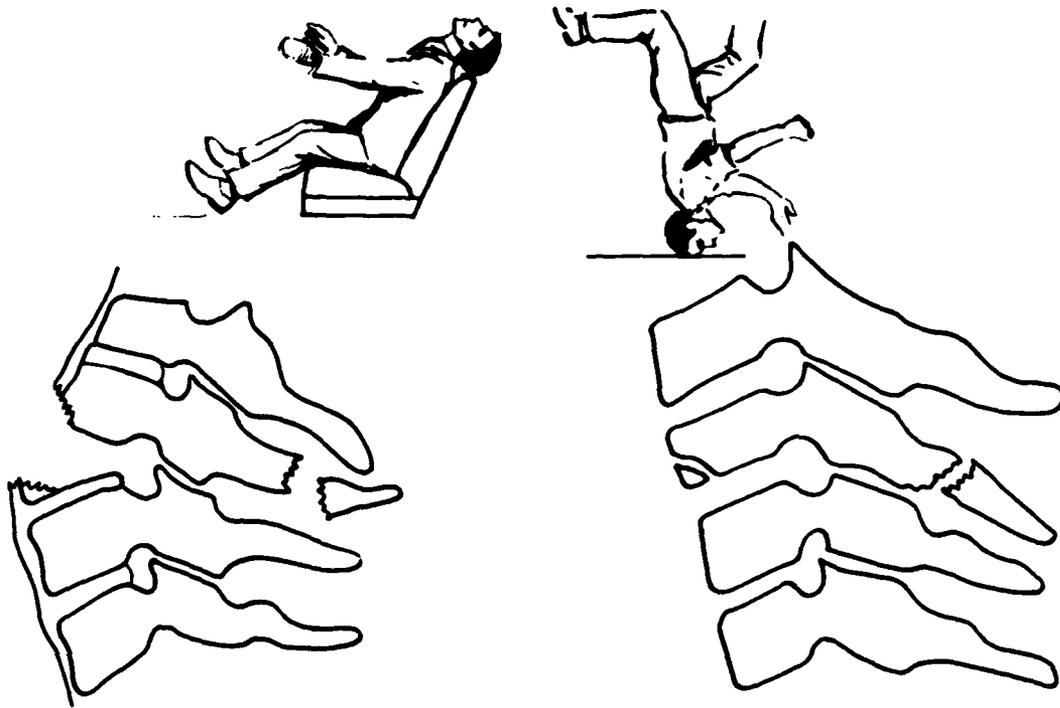


Figure 55 : Mécanisme des fractures du rachis cervical
a) - b) par extension
d'après G. LAVARDE (359)

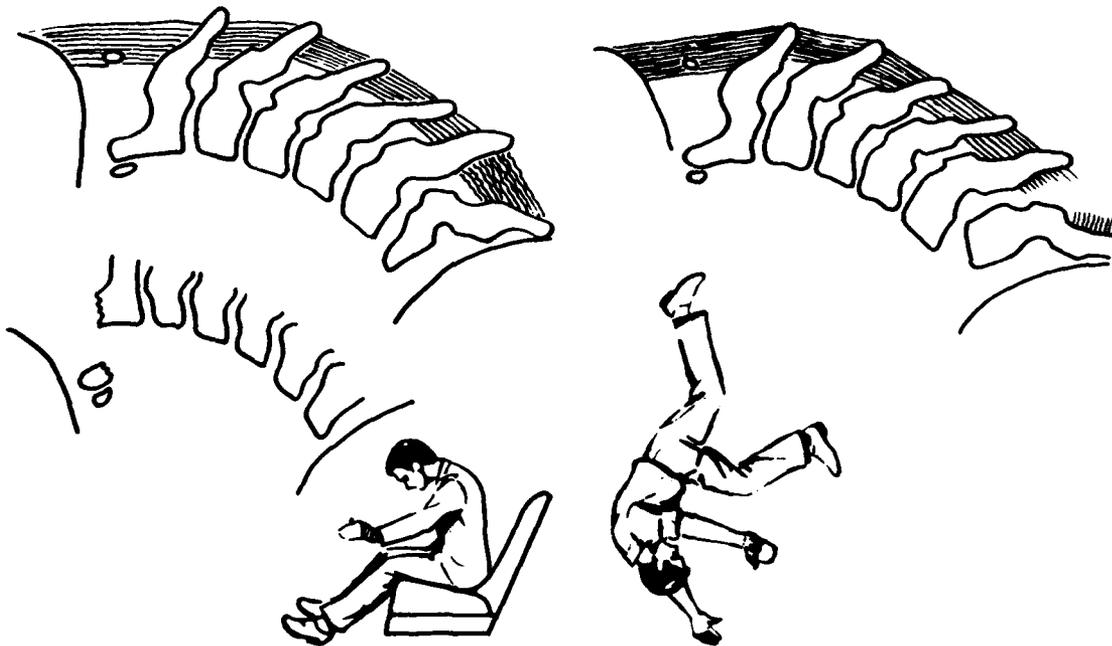


Figure 56 : Mécanisme des fractures du rachis cervical
c) - d) par flexion
d'après G. LAVARDE (359)

La force postérieure agit perpendiculairement au rachis sur la partie supérieure du corps tandis qu'il est entraîné vers l'avant. Le trait de fracture parcourt toute la vertèbre d'arrière en avant. La fracture luxation apparaît. De façon constante, il existe toujours une rupture du mur postérieur des ligaments inter-épineux et inter-apophysaires. Parfois, s'y associe un déplacement latéral entraînant une rotation soit vers la droite soit vers la gauche du segment supérieur de la colonne. Dans ce cas, les atteintes des articulaires et des corps vertébraux sont constantes.

5.2.2. Mécanisme physiopathogénique des fractures et luxations du rachis cervical

Les mécanismes étudiés par Watson-Jones (448) et Nicoll (380) s'appliquent surtout à la colonne dorso-lombaire. Pour le rachis cervical, d'autres interviennent soit isolément soit associés aux précédents : l'inflexion latérale et surtout l'hyper-extension (359)(449).

5.2.2.1. L'inflexion latérale

Associée à la flexion, cette position contribue à la formation de tassements vertébraux assymétriques. Cette inflexion latérale s'observe par exemple chez le parachutiste, le pilote au cours d'un crash avec retournement de l'avion et rupture du fuselage, d'un accident d'hélicoptère. La tête frappe le sol, l'arrachement d'une ou plusieurs apophyses transverses cervicales, la paralysie plus ou moins complète du plexus brachial apparaissent.

5.2.2.2. L'hyper-extension (fig. 55) (268)

Ce mécanisme très particulier s'observe essentiellement au niveau du rachis cervical : sujet tombant brutalement en arrière sur la tête, pilote et passager d'un hélicoptère au cours d'un crash, parachutiste. L'hyperflexion cervicale est limitée en général à un angle de 20° par le contact du menton avec le sternum. Par contre, l'amplitude du mouvement d'extension atteint parfois 90° grâce à l'extrême laxité des articulations et des ligaments. Par ordre de gravité croissante, apparaissent les lésions suivantes :

- une rupture du surtout fibreux prévertébral,
- un arrachement simultané du coin antérieur et inférieur de la vertèbre sous jacente,
- une rupture du disque et une désinsertion ,
- une lésion de l'arc postérieur (fracture des apophyses articulaires et des apophyses épineuses).

L'importance de certains déplacements cervicaux par ce mécanisme d'hyper-extension n'est pas toujours évidente car ils se réduisent alors spontanément. Le plus souvent, sous l'effet de la décélération, les mouvements de bascule de la tête se produisent successivement d'avant en arrière puis d'arrière en avant, réalisant le mouvement classique du coup de sonnette au plus vif, plus rapide du coup de fouet (Whip lash injury des auteurs anglo-saxons) (446)(447)(448).

5.2.2.3. L'hyperflexion (fig 56) (323)

Les traumatismes par hyperflexion ne sont pas rares : chute au cours d'arrivée au sol, ou plongée dans l'eau, percussion du crâne contre le tableau de bord ou un obstacle). La perte du casque protecteur, souvent observée dans de nombreux cas, explique la coexistence d'importantes lésions du massif facial.

5.3. ETIOPATHOGENIE

5.3.1. Le crash

R.P. DELAHAYE, R. AUFFRET

Sommaire :

- 5.3.1.1. Le crash des différents types d'avions
 1. Les avions légers de tourisme
 2. Les planeurs
 3. Les avions militaires
 4. Les avions de transport des passagers
- 5.3.1.2. Localisation des fractures du rachis
- 5.3.1.3. Lésions associées aux fractures du rachis
- 5.3.1.4. Mécanisme physiopathogénique
 1. Les forces et les accélérations dans les crashes
 2. Pathogénie des fractures du crash
 3. Pathogénie des lésions associées

5.3.1.1. Le crash des différents types d'avions

Les atterrissages en catastrophe ou crashes qui se produisent parfois sur des terrains aménagés ont lieu fréquemment en dehors d'aérodromes, souvent sur des sols très accidentés.

Le crash peut être choisi comme le moyen de sauvetage des avions légers de tourisme, des planeurs, des avions lourds de transport de passagers (avions des compagnies privées ou des Armées). Les accidents d'hélicoptère qui entrent dans cette catégorie seront traités plus loin (voir 5.3.2.1).

En aéronautique militaire, grâce au développement et à la mise au point de moyens d'évacuation individuelle (siège éjectable, parachute) le crash avec les avions à vitesse d'approche élevée est une manoeuvre généralement interdite.

Le mécanisme physiopathogénique des fractures de la colonne vertébrale et des lésions associées est pratiquement identique quelque soit le type d'appareil. Une meilleure connaissance du déroulement des différentes séquences du crash est due à l'étude systématique en laboratoire des accidents d'automobile et aux dépouillements des différentes données recueillies au cours de ces expérimentations.

1. Les avions légers de tourisme

G. Plantureux, R. Auffret, J. Lavernhe (182) en utilisant le fichier du bureau " Enquête accidents de l'inspection générale de l'aviation civile " (Ministère des Transports) étudient 1416 accidents aériens survenus dans l'aviation légère de tourisme en France au cours des années 1974 à 1977 inclus (tableau 5.1).

Le nombre de dommages corporels (blessures et décès) supérieur à celui des accidents, s'explique par les blessures multiples et les passagers nombreux.

	Nombre d'accidents	Décès	Blessés
Avions	275	243	291
Planeurs	61	15	43
TOTAL	336	258	334

TABLEAU 5-1

Les fractures du rachis sont retrouvées dans 23 cas sur 117 accidents des deux dernières années (1976-1977) ayant fait l'objet d'enquêtes médicales selon la nouvelle procédure. Ces localisations figurent dans le tableau 5-2

Gervicales	C5	1
3	C7	2
Dorsales	D8	1
4	D11	1
	D12	2
Lombaires	L1	9
16	L2	3
	L3	1
	L4	2
	L5	1

TABLEAU 5-2

2. Les planeurs

Les accidents à l'atterrissage s'observent généralement chez de jeunes pilotes peu expérimentés qui, par suite d'une mauvaise estimation, manquent leur présentation sur la piste (Crance).

Au décollage (oubli par le pilote de rentrer les aérofreins), le crash est plus rare. Les pertes de contrôle : mise en autorotation avec descente en vrille jusqu'au sol (6,5% des cas) entraînent souvent la mort ou des lésions graves (fractures du rachis avec atteinte neurologique).

La vulnérabilité du pilote placé en avant du fuselage doit être soulignée. En cas de choc frontal, les membres inférieurs sont plus particulièrement exposés. G. Stedtfeld (234) constate que le vol à voile vit des exigences absolues de l'aérodynamique. Le pilote doit s'adapter en renonçant largement à sa liberté de mouvement et au confort de sa position. Dans les planeurs modernes, le pilote peut être couché (décubitus dorsal).

Depuis plusieurs années, tant à l'hôpital Bégin qu'à l'Hôpital Dominique Larrey, nous avons suivi 13 pilotes atteints de fractures du rachis consécutives à des accidents de planeurs. Ces lésions siègent au niveau de D12, L1, L2. Dans tous ces cas, les atteintes furent multiples : membres inférieurs fracturés (tibia, fémur, calcaneum), bassin fracturé, lésions de la vessie et de l'urèthre. Les complications neurologiques (paralysie, syndrome de la queue de cheval) sont fréquentes (5 cas sur 13).

3. Avions militaires

Ce paragraphe est réservé aux avions conventionnels à hélice et aux réacteurs subsoniques (avions de chasse). Nous ne comprenons pas les avions de transport - type Transall ou KC 135, DC 8. D'une statistique de 1961 de l'Armée de l'Air Française (47) nous notons que la fréquence de survenue des fractures de la colonne est plus grande avec les réacteurs ce que confirme les travaux plus anciens (1) (89) ou des faits isolés récents (72)

TYPE D'AVIONS	Nombre accidents	Nombre de sujets ayant une fracture du rachis
AVIONS MONOMOTEURS (T6, Broussard, etc ...)	88	4 (4,5%)
AVIONS A REACTION (Mystère, Fouga, Vautour, T33, F 84, etc ...)	166	12 (7,2%)

Tableau 5-3 d'après Grandpierre et Coll (112)

Les fractures siègent essentiellement au niveau de la dernière dorso-lombaire (D11-L2), les atteintes dorsales moins fréquentes et les localisations cervicales rares (85) (114).

4. Avions de transport de passagers (Compagnies privées et Armées)

Faute de moyens d'évacuation individuelle avant le contact avec la terre, le crash est la seule issue en cas de détresse. Selon la nature du terrain et la configuration de l'avion, les accélérations varient en amplitude et en direction.

Au cours des impacts importants, l'insuffisance d'ancrage des sièges dans le plancher entraîne l'amoncellement de passagers toujours solidaires de leur siège, dans la partie avant de leur compartiment. Dans ces polytraumatismes, les fractures du rachis, à majoration dorsolombaire, se rencontrent parfois.

5.3.1.2. Localisation des fractures du rachis dans les crâns

L'étude des différents travaux consacrés au crash permet d'affirmer la fréquence des localisations au niveau de D10-L2 (65 à 75%). Cette caractéristique non spécifique du crash se retrouve dans toutes les statistiques de traumatologie publiées ces dernières années (139). Les localisations multiples ne sont pas exceptionnelles. Dans plusieurs crashes d'avions de tourisme, nous notons une association à deux niveaux cervical et lombaire.

Les fractures des apophyses transverses des vertèbres lombaires seules et généralement multiples ou associées à d'autres fractures lombaires ou dorsales, ne sont pas rares. Nous ne pensons pas, comme Barrie et Coll (12) que ces fractures

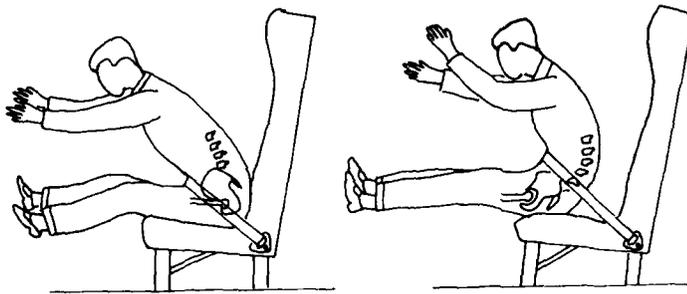


Figure 57 : Effet de la décélération lorsque le corps est maintenu par la ceinture abdominale
d'après FRYER D.J. In Gillies (106)

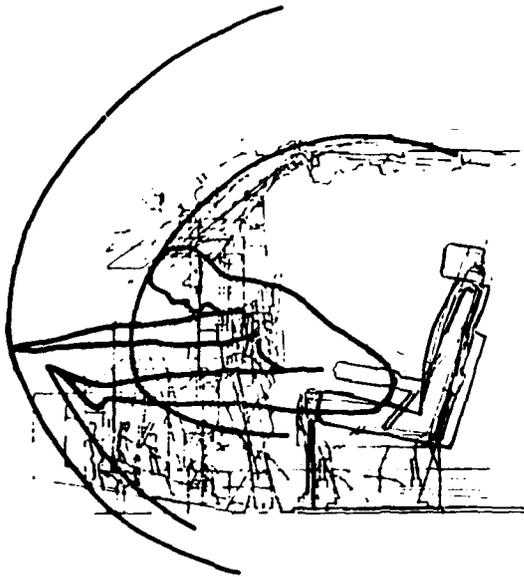


Figure 58 bis : Aire de déplacement antérieur avec une ceinture abdominale d'après schémas relevés dans onze accidents d'aviation
d'après SWEARINGHAM (140)

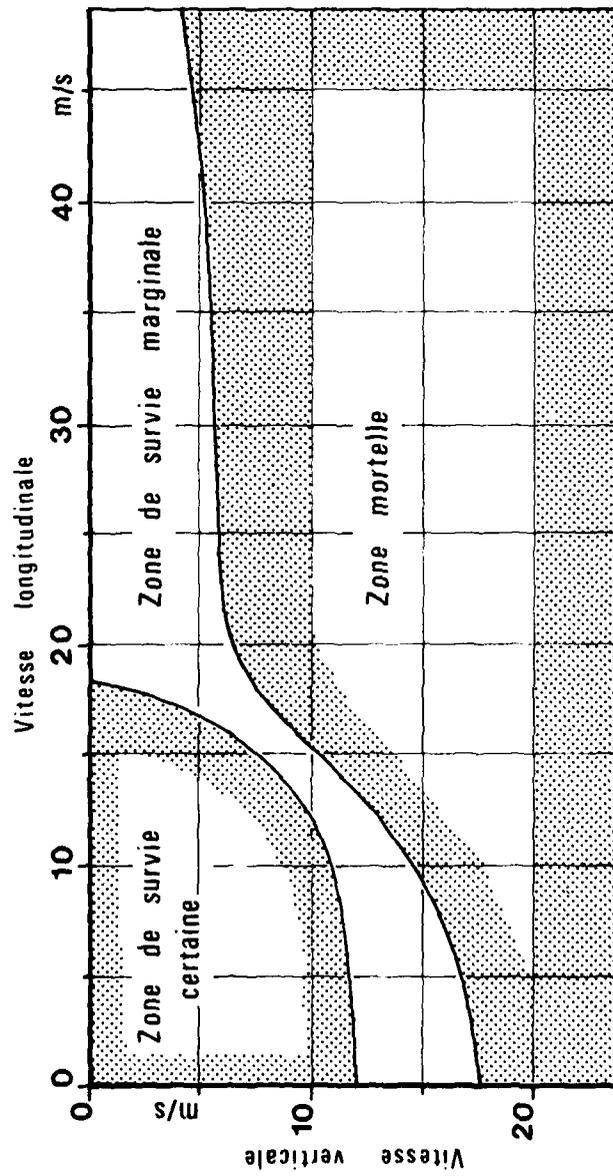


Figure 56 a : Courbes de survie liées aux vitesses d'impact
d'après W. JOHNSON et A.G. MARALIS (140)

s'observent très souvent et qu'il s'agirait d'une atteinte presque spécifique du crash. En réalité, il y a pratiquement toujours un traumatisme direct qui est à l'origine des fractures des transverses.

Par contre, nous partageons l'avis de R. Drew et Coll (80) qui, après avoir examiné plusieurs victimes d'accidents aériens (Beechcraft, Cessna 337) insistent sur la fréquence des atteintes neurologiques (paraplégie, syndrome de la queue de cheval).

5.3.1.3. Lésions associées aux fractures du rachis du crash

L'analyse des différentes lésions apparaissant après le crash permet d'individualiser plusieurs syndromes selon la région de l'organisme ayant été traumatisé par la projection de l'individu insuffisamment sanglé.

1. Syndrome genou-hanche (appelé ultérieurement syndrome du tableau de bord), comprenant des lésions du genou (fracture ou luxation de la rotule, fracture du plateau tibial), de la hanche (luxation postérieure, fracture du col du fémur), du bassin (fracture de l'ile iliaque, des branches ilio et ischio-pubiennes), du fémur (tiers inférieur ou diaphyse).

2. Un syndrome céphalique dû au choc de la tête non protégée par un casque contre le tableau de bord ou la verrière avant (syndrome appelé en traumatologie automobile, syndrome du parebrise) comprenant une commotion cérébrale des fractures du crâne (voule et base), des fractures de la colonne cervicale par le mécanisme du coup de fouet (Whip lash des auteurs anglo-saxons). Cet ensemble de lésions entraîne 80% de mortalité.

3. Un syndrome thoracique par choc direct du thorax contre le tableau de bord ou toute autre partie de l'avion (syndrome du volant des accidents de voitures comprenant des fractures du sternum, de côtes, des pneumothorax, des hémithorax, une rupture de l'aorte et des gros vaisseaux de la base, des ruptures du diaphragme, du foie, de la rate).

5.3.1.4. Mécanisme physiopathogénique

1. Les forces et les accélérations dans le crash

Les accélérations dans le crash atteignent des valeurs d'amplitude extrêmement importantes 100 à 500 G dans des temps très courts 1/100 à 1/1000 de seconde. Ces valeurs ont pu être mesurées dans des simulations de crash avec des avions légers. Ces accélérations sont linéaires (longitudinales, transversales) et même angulaires ou combinées plusieurs à la fois.

Les forces transmises aux occupants de l'avion subissent des variations extrêmement nombreuses tenant à de nombreux facteurs (106) :

- leur atténuation et leur absorption par les structures placées entre le sol et l'occupant, par les surfaces de l'avion entrant en collision avec le sol,
- la distance de l'occupant avec le point d'impact,
- la surface, la configuration, la résistance des objets contre lesquels le personnel navigant est décéléré,
- l'atténuation et l'absorption des forces par le corps du pilote ou du passager victime du crash,
- la vitesse d'application de ces forces par leurs caractéristiques de fréquence,
- leur durée.

C'est dire la difficulté de reconstituer avec précision les circonstances d'un accident ou du moins les derniers moments précédant le crash. Il est souvent impossible de faire préciser à un blessé souvent sérieux, sa position précise, sa façon d'être assis, le degré de sanglage.

2. Pathogénie des fractures du rachis apparaissant lors des crashes

Watson-Jones en Grande Bretagne a le premier démontré qu'il existe une coïncidence entre le mécanisme et les lésions en se basant sur l'observation de 1058 fractures rachidiennes observées pour la plupart dans la R.A.F. lors de la dernière guerre mondiale.

Il s'agit de FRACTURES PAR FLEXION PLUS OU MOINS IMPORTANTES DU RACHIS.

La courbure du rachis se modifie selon la position des sangles. Le pilote au moment du crash serre et bloque ses sangles. Il prend appui sur le palonnier et applique le dos contre le dossier du siège. Dans cette position assise, la cyphose dorsale physiologique se modifie peu alors qu'il y a une diminution de l'hyperlordose lombaire. Dès 1961, chez des sujets assis sur des sièges aéronautiques transportés dans des salles de radiologie, nous avons pu vérifier ces faits (52)(57)

Au moment du crash, il se produit une brusque décélération qui entraîne une hyperflexion du tronc. Ces sangles de fixation jouent un rôle protecteur efficace en empêchant le pilote d'être projeté contre le tableau de bord (fig 57). Selon le degré de sanglage et la position plus ou moins haute de fixation des harnais,

la flexion de la colonne se produit soit au niveau de la charnière D12-L1 ou plus haut chez les longilignes D2 à D7.

Les fractures du crash répondent aux mécanismes décrits par Watson-Jones (voir 5-1). Elles sont essentiellement liées à une hyperflexion associée à l'application d'une force créant une accélération Gz +. C'est pourquoi nous ne pensons pas que l'individualisation des fractures dues à la ceinture (seat belt fractures des auteurs USA) mérite d'être reconnue et admise (187)(257)(271)(281)(441).

Les localisations cervicales n'apparaissent dans les crashes que dans des circonstances très particulières : il s'agit le plus souvent d'un heurt direct de la colonne cervicale ou de la tête, plus rarement d'un whip lash. Il est certain que dans les avions légers possédant des sièges dont la hauteur est inférieure à celle de l'homme assis, le risque de lésions cervicales est beaucoup plus grand.

3. Pathogénie des lésions associées aux fractures de la colonne vertébrale

La contention par sangles efficaces s'avère indispensable et son intérêt était apparu dès 1937, dans de nombreuses Armées de l' Air. Les nombreux crashes observés au cours de la 2ème Guerre Mondiale ont confirmé la nécessité d'un sanglage correct. Les laboratoires de recherches s'intéressant aux accidents d'automobile ont, dans des travaux très documentés, fait progresser nos connaissances. En particulier, la cinématique de l'occupant assis et exposé à des forces de collision est étudiée lors d'impacts de véhicules. Grâce à des enregistrements cinématographiques (Snyder)(231) on a pu individualiser les différentes séquences. Les travaux d' EWING (84)(86) facilitent une meilleure compréhension des phénomènes.

Si le passager ou le pilote n'est pas maintenu par un système efficace de contention et que l'avion effectue un crash, les phénomènes suivants sont décrits :

- le sujet glisse de son siège vers l'avant jusqu'au moment où ses genoux entrent en contact avec le tableau de bord ou le siège placé devant lui (syndrome du tableau de bord),
- le thorax plonge vers l'avant. La tête entre en contact avec le tableau de bord ou avec le dossier du siège,
- la partie inférieure du corps poursuit son mouvement vers le bas (effet sous-marin, créant une hyper-extension).

Pour Snyder, il existe trois problèmes fondamentaux relatifs à la protection de l'occupant (231).

- a) Limitation des mouvements de l'occupant (pilote, personnel navigant, passager) pour l'empêcher d'entrer en contact avec les structures susceptibles de créer des blessures (fig. 58 bis).
- b) Limitation des accélérations plus particulièrement Gz + par l'emploi d'un coussin de siège adapté,
- c) Réduction des mouvements entre des éléments corporels adjacents. Les mouvements de la tête en whip lash sont réduits par l'emploi d'un siège haut empêchant les mouvements d'hyper-extension.

Une ceinture de siège est efficace si elle évite l'éjection du sujet assis. Cependant, elle ne peut pas toujours empêcher le heurt avec d'autres structures de l'avion (140).

La figure 58 a d'après (140) est la courbe donnant la relation entre vitesse d'impact et survie.

5.3.2. Les accidents d' Hélicoptère

B. VETTES, R.P. DELAHAYE

Sommaire :

- 5.3.2.1. Introduction
- 5.3.2.2. Les accidents d'hélicoptère
 - 5.3.2.2.1. Généralités
 - 5.3.2.2.2. Etudes statistiques
 - 1. Hélicoptères civils
 - 2. Hélicoptères militaires
 - 5.3.2.2.3. Répartition des fractures vertébrales
- 5.3.2.3. Les différentes catégories d'accidents d'hélicoptères
 - 5.3.2.3.1. Crash en arrivée au sol en autorotation
 - 5.3.2.3.2. Crash avec perte de contrôle
 - 5.3.2.3.3. Discussion sur cette classification
- 5.3.2.4. Physiopathogénie des lésions vertébrales
 - 5.3.2.4.1. Crash avec choc purement vertical
 - 5.3.2.4.2. Crash avec composante horizontale importante.

5.3.2.1. Introduction /

Dès la fin de la guerre 1939-1945, l'hélicoptère connaît un essor formidable dans les domaines d'application civile et militaire.

Les missions civiles sont très nombreuses et extrêmement variées : sauvetage en montagne ou en mer, évacuation et transport de malades ou de blessés, transport personnel " porte à porte " (USA) utilisation agricole (saupoudrage d'insecticides ou de produits anticryptogamiques sur de grandes superficies*, surveillance forestière, routière, maritime. Aussi de 1967 à 1977, la flotte d'hélicoptères civils U.S.A. est passée de 487 appareils à 7.160.

Dans le domaine militaire, l'hélicoptère a démontré la gamme de ses possibilités d'emploi : parachutage, héliportage de commandos, lutte antichar, surveillance maritime, lutte anti sous marine, évacuation et transport de blessés.

5.3.2.2. Les accidents d'hélicoptère /

5.3.2.2.1. Généralités :

Cette utilisation croissante de l'hélicoptère s'explique par ses qualités de manoeuvrabilité : décollages et atterrissages verticaux, vols stationnaires. De plus l'hélicoptère n'a pas besoin d'une infrastructure du sol très sophistiquée : une grande terrasse, une cour d'hôpital, un terrain de sport suffisent comme héliport.

Malheureusement, du fait même de ses qualités et de la nature toujours plus dangereuse des missions, l'hélicoptère est sujet à de multiples accidents souvent très graves.

Le bilan tragique avec ses nombreux tués, brûlés, noyés, blessés s'explique en partie par le manque de système d'évacuation en vol, par l'insuffisance fréquente de protection contre les effets du crash et de l'incendie.

Les évolutions de l'hélicoptère ont lieu le plus souvent à basse altitude ou très basse altitude. Ainsi une moindre erreur de pilotage, un mauvais fonctionnement des commandes de vol, une perte de contrôle, une avarie ou une perte du rotor principal ou du rotor de queue, une collision aérienne, une explosion due à un incendie, une congélation de la transmission provoquent irrémédiablement la chute de l'appareil et l'impact sur le sol ou l'eau.

* surveillance des troupeaux, transport de gros matériel

La mauvaise résistance des réservoirs de carburant entraîne trop souvent leur éclatement à l'impact lors du crash et explique en partie la brutalité de développement de l'incendie pour ne laisser que quelques débris calcinés (moteurs, fuselage en alliage de magnésium, cadavres calcinés). Beaucoup de noyades se produisent par suite de l'enfoncement trop rapide de l'hélicoptère, de l'insuffisance de flottaison de secours, de l'impossibilité pour les occupants de quitter rapidement l'appareil ou des difficultés pour dégager et déployer rapidement les canots pneumatiques de secours.

5.3.2.2.2. Les études statistiques :

Il est toujours extrêmement difficile d'établir une statistique des accidents d'hélicoptère en milieu civil et d'avoir un aperçu précis de la nature, de la fréquence, de la sévérité et de la localisation des lésions des occupants (équipage et passager).

En milieu militaire, quelque soit le pays, ces critères sont souvent mieux définis et analysés par les commissions d'enquêtes.

1. Hélicoptères civils (fig 59)

Accidents USA 1964-1975 inclus	Morts	Blessés	Indemnes
Equipages	299	368	3449
Passagers	314	244	2390
TOTAL	613	612	5839

Tableau 5-4

Ce tableau 5-4 d'après R.G. SNYDER (232) se base sur l'étude de 3575 accidents d'hélicoptères civils survenus aux USA de 1964 à 1975 inclus, soit une moyenne de 255 accidents par an sur 7064 personnes accidentées (soit une moyenne de 505 par an), 5839 (soit 82,7%) ont été pas ou peu légèrement blessés. Ce pourcentage est peu différent de celui observé sur les avions à ailes fixes de 1967 à 1976 inclus 78,8%.

Le nombre d'accidents varie de 222 (1971) à 298 (1975) et 304 (1976)

R.G. SNYDER compare la fréquence des morts et des blessés dans les équipages d'hélicoptères civils et les passagers. Il utilise deux données particulières :

- l'indice annuel de mortalité en divisant le nombre annuel de tués par le nombre annuel d'accidents ;
- l'indice annuel de blessés graves en divisant le nombre annuel de blessés graves par le nombre annuel d'accidents.

L'indice annuel de mortalité est toujours plus élevé chez les passagers. Par contre, l'indice annuel de blessures graves est toujours supérieur chez les membres d'équipage. Malheureusement, R.G. SNYDER dans son important travail (232) ne précise pas la répartition des lésions dans les blessures graves et les blessures légères.

Le tableau 5-5 fixe les données de la statistique des 91 accidents d'hélicoptères civils survenus en France de 1972 à 1979 inclus. Il n'intéresse que les tués et les blessés de 36 accidents ayant occasionné des dommages corporels, les appareils étant détruits à 100%. Ceci explique le faible nombre de sujets indemnes.

	Morts	Blessés	Indemnes
Equipage et passagers	22	33	8

Tableau 5-5 : Accidents d'hélicoptères civils
(1972 - 1979 inclus)

Parmi les blessés, il y a 6 fractures du rachis la plupart siégeant au niveau de D12-L1.

2. Hélicoptères Militaires

Aux U.S.A., SINGLEY (218), SAND (202) et HALEY (125) établissent les critères, la fréquence et les localisations corporelles des blessures dans les accidents d'hélicoptère de l' US Army.

Les lésions dans 50% de cas siègent au niveau de la tête, des membres inférieurs et supérieurs. Les traumatismes crâniens, les atteintes polysegmentaires des membres, les brûlures sont responsables de 70% des morts (SAND) (202).

	J.H. HALEY (25)	L.D. SAND (202)
Origine	U.S. Army	U.S. Army
Période de l'étude	Janv. 1967 à Déc. 1969	Janv. 1972 au 30/09/77
Nombre d'accidents	2546	388
Nombre de personnes	11334	
Nombre de décès	1094 (9,6%)	133
Nombre de blessés	2699 (23,8%)	934
Nombre d'atteintes vertébrales (fractures, entorses, contusions)	525	94
Nombre de fractures du rachis	180	73

Tableau 5-6

La fréquence des atteintes rachidiennes (fractures, entorses, contusions) dans les accidents d'hélicoptère varie selon les statistiques. Si l'on apprécie cette fréquence par rapport à celles des blessures, il apparaît, dans les travaux américains, une variation de 1 à 3.

BEZRECH (27)	: 6%
MATTOX (169)	: 13
SAND (202)	: 10
HALEY (125)	: 19

Les fractures du rachis représentent une part importante de la traumatologie vertébrale des accidents d'hélicoptère qui varie de 25 à 77% des traumatismes rachidiens selon les travaux analysés.

- Hélicoptères Français -

Le tableau 5-7 fixe la répartition annuelle des accidents d'hélicoptères militaires français des 3 Armées, de 1969 à 1979.

: Année :	Nombre accidents: aériens :	Tués ou disparus :	Blessés graves :	Blessés légers :
: 1969 :	3 :	6 :	1 :	3 :
: 1970 :	11 :	3 :	9 :	4 :
: 1971 :	15 :	:	4 :	5 :
: 1972 :	11 :	1 :	:	2 :
: 1973 :	9 :	7 :	3 :	7 :
: 1974 :	6 :	3 :	1 :	3 :
: 1975 :	5 :	7 :	2 :	3 :
: 1976 :	12 :	32 :	10 :	14 :
: 1977 :	2 :	5 :	3 :	:
: 1978 :	9 :	11 :	4 :	16 :
: 1979 :	6 :	6 :	:	10 :
:	:	:	:	:
: Totaux :	89 :	81 :	33 :	67 :
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:

Tableau 5-7

14 fractures du rachis sont observées parmi les 100 blessés.

5.3.2.2.3. Répartition des fractures vertébrales

Elles siègent le plus fréquemment au niveau de la charnière dorsolombaire D12-L1 mais intéressent également D10, D11 et L2. Ces localisations entre D10 et L2 s'accompagnent parfois de lésions nerveuses (paraplégie, syndrome de la queue de cheval). Ces complications ne sont pas rares, 3 cas sur 14 dans la statistique française des 3 Armées. Depuis plusieurs années, nous avons eu l'occasion de suivre à l'HIA BEGIN plusieurs pilotes d'armées étrangères atteints de lésions nerveuses irréductibles. Ces faits nous confirment dans l'idée que les accidents d'hélicoptère sont parmi les traumatismes aéronautiques entraînant des fractures ^{cervicales} créant le plus de complications neurologiques.

Les localisations dorsales des fractures ne sont pas rares. Par contre, les fractures cervicales sont certainement plus fréquentes que la lecture des différentes statistiques le laisse présager. Assez souvent, il n'est pas fait l'examen radiologique systématique du rachis cervical dans de nombreux cas d'accidents civils d'hélicoptère.

5.3.2.3. Les différentes catégories d'accidents d'hélicoptères /

Les accidents d'hélicoptères peuvent schématiquement être divisés en deux catégories selon que l'appareil reste contrôlé ou non par le pilote lors de l'impact au sol.

5.3.2.3.1. Crash " en arrivée au sol en autorotation "

Le crash en autorotation est à l'hélicoptère ce que l'atterrissage en

catastrophe (trains rentrés ou non) est à l'avion, c'est à dire une manoeuvre de sauvetage. Actuellement, le seul moyen d'effectuer une descente est un atterrissage après une situation d'urgence en vol est d'effectuer une autorotation. L'autorotation est une manoeuvre exécutée sans l'aide de moteur, lors de laquelle l'écoulement de l'air vers le haut, à travers le système de rotor, provoque la rotation en "roue libre" des pales, pendant la descente de l'hélicoptère. Juste avant l'impact, le tournoiement du système de rotor est transformé en portance, au fur et à mesure que le pilote agit sur la commande de pas (angle d'attaque de pale de rotor) effectuant ainsi une manoeuvre pour obtenir un taux de descente raisonnable. L'autorotation a seulement été étudiée pour pallier une perte de puissance en vol. Pour réussir, les conditions suivantes doivent être réunies :

- contrôle de l'hélicoptère,
- vitesse et altitude suffisantes, avant de procéder à l'autorotation,
- conditions atmosphériques favorables, telles que le vent,
- terrain d'atterrissage praticable,
- visibilité suffisante et une technique de pilotage convenable.

Dans ce cas, l'appareil se pose avec une vitesse horizontale relativement faible et une vitesse verticale plus ou moins importante. Cela peut aller de l'atterrissage normal à l'impact dur ou même destructif correspondant à une véritable chute libre. Le crash en arrière en autorotation correspond à environ 42,3% des accidents d'hélicoptères (statistique de KIMBALL et Coll (151) pour l'armée américaine dans les années 70.71.72). L'accélération subie par les occupants de l'appareil est essentiellement dirigée selon l'axe longitudinal du corps (axe Z) et l'on comprend que la colonne vertébrale soit fortement sollicitée et directement menacée.

5.3.2.3.2. Le crash avec perte de contrôle

La perte de contrôle d'un hélicoptère en vol peut survenir au cours de la perte d'une ou plusieurs pales du rotor principal et anticouple, d'une collision aérienne de dégâts importants occasionnés en combat, d'incendie ou d'explosion, de givrage ou de congélation des carter de transmission. L'appareil se met en vrille et heurte le sol sous n'importe quelles incidences. Les dégâts sont alors considérables et on retire très souvent d'un amas de ferraille tordue de nombreux morts ou blessés graves affectés de polytraumatismes qui ne sont pas spécifiques.

De plus, la perte d'une pale en vol induit parfois des vibrations très importantes. Dans un cas d'accident rapporté aux ETATS-UNIS, les accélérations engendrées ont pu créer des ruptures d'organes en vol et la mort du pilote avant l'impact au sol.

Très souvent du fait de leur élasticité et de leur inertie sous le choc les pales du rotor peuvent broyer la cabine de pilotage, blesser grièvement ou décapiter les occupants et provoquer un incendie.

5.3.2.3.3. Discussion sur cette classification

Cette division schématique en crash en arrivée au sol en autorotation et en crash après perte de contrôle de l'appareil correspond-elle à la distinction faite par les auteurs américains (MEEK (250) et HALEY (125)).

Ces auteurs considèrent deux types d'accidents :

- crash avec des chances de survie,
- crash sans chance de survie.

Dans le premier cas, toutes les conditions sont réunies pour que les forces transmises à l'appareil, aux sièges et aux systèmes de contention (ceinture, harnais) ne dépassent pas les limites de la tolérance humaine. La résistance de la structure est assez grande pour éviter l'écrasement des occupants lors de l'impact. Il est donc permis de considérer qu'il y aura des survivants.

Les chances de survie sont encore augmentées s'il existe des systèmes anti-crash, de flottaison et de prévention contre l'incendie.

Dans le deuxième cas (crash sans chance de survie), l'impact est extrêmement fort, les forces transmises sont au delà des limites de la tolérance humaine.

L'attitude d'atterrissage est anormale et le plus souvent l'appareil explose à l'arrivée au sol.

Le premier type (crash avec chances de survie) peut effectivement correspondre à un crash consécutif à une autorotation plus ou moins réussie et le deuxième à un crash après perte de contrôle.

HALEY (125) publie une étude intéressant plusieurs catégories d'hélicoptères : légers d'observation, légers d'attaque, lourds et de transport de troupes. Il constate pour ces accidents avec chance de survie un nombre élevé de morts et de blessés graves. Du 1er janvier 1967 à fin décembre 1969, 10.599 personnes (membres d'équipages et passagers) sont impliqués dans 2.388 accidents avec chances de survie. Il y a 439 morts, 2.663 blessés et 7.497 indemnes.

Inversement, 6% de personnels sortent indemnes d'accidents avec aucune chance de survie (2^e type de Meek et Haley). Sur un total de 735 passagers pour 158 accidents, il y a eu 655 morts, 36 blessés survivants et 44 indemnes.

5.3.2.4. Physiopathogénie des lésions vertébrales /

Nous distinguerons le crash avec choc purement vertical (accident en autorotation) du crash avec composante horizontale importante (2^e variété avec faible chance de survie).

5.3.2.4.1. Crash avec choc purement vertical

Cette arrivée au sol avec autorotation avec impact dur crée les conditions idéales pour faire apparaître des fractures vertébrales par compression correspondant le plus souvent aux deux premiers types décrits par WATSON-JONES (448).

Lors d'un accident en autorotation, la position du pilote tout occupé à sa manoeuvre, penché en avant, surveillant le compte-tours rotor et la zone d'atterrissage est un facteur favorisant la mise en flexion du rachis. Sous l'effet de la décélération brutale (Gz) le rachis se fléchit au niveau de son pivot naturel : la charnière dorso-lombaire, notion qui doit être élargie à la zone allant de D10 à L2, où les fractures sont fréquentes en cas de crash en autorotation.

La localisation lombaire basse (L3 à L5) est due à une compression verticale sans rôle d'amortisseur des membres inférieurs. Des fractures de ce type peuvent se rencontrer lors de crash.

Les quelques observations suivantes rapportées par DELAHAYE et Coll (52) et ITALIANO (137) illustrent parfaitement ce type de fracture.

Pilote sur Alouette 2 : La perte d'une pale du rotor anticouple entraîne l'arrachage immédiat du boîtier du rotor de queue. Le crash en autorotation turbine non coupée d'une altitude de 700 mètres a lieu dans la plaine. La phase terminale a lieu face au vent et l'appareil se plaque brutalement à plat de 1 mètre à 1,50 mètre (erreur due à la présence de blés hauts, faussant l'appréciation de la distance). Le pilote a 2 fractures intéressant D10 et D11.

Pilote sur Bell 47 G 2 : Lors d'un vol technique (sortie de révision anticouple), l'appareil tombe en panne. Le pilote réagit mal, ses manoeuvres accentuent la cadence et font chuter les tours du rotor principal. La tentative d'autorotation s'effectue tardivement. Les radiographies montrent que L3 a un tassement cunéiforme antérieur sur le cliché de profil. L'incidence de face affirme une asymétrie (tassement latéral droit).

Pilote sur Bell 47 G 3 : Pendant un vol à faible altitude, l'hélicoptère tombe à la suite d'une collision avec un autre appareil. Le pilote présente une fracture de D12 (tassement cunéiforme antérieur).

Pilote sur Bell 47 G 4 : En vue d'un vol de reconnaissance, le pilote exécute un décollage en frottant sur la piste herbeuse parallèle à la piste d'envol. Pendant cette manoeuvre, l'hélicoptère tombe d'une hauteur de 1 mètre environ, heurtant le sol de la partie postérieure du patin gauche. Le pilote présente une fracture de L1 avec écrasement complet du corps vertébral.

Pilote sur Bell 47 J : Pendant un vol de traitement agricole, il y a rupture de transmission du rotor de queue, l'hélicoptère tombe d'une hauteur d'environ 1 mètre. Le pilote est atteint d'une fracture de L1 (tassement cunéiforme antérieur).

5.3.2.4.2. Crash avec composante horizontale importante

Ce crash s'effectue non seulement avec une accélération verticale importante mais avec une accélération horizontale ou même latérale. Selon HICKS, le taux de fracture augmente au fur et à mesure que la vitesse verticale s'accroît mais aussi quand il y a une composante horizontale et latérale au moment de l'impact. Les fractures observées sont de différents types et ne siègent pas toutes au niveau de la charnière dorso-lombaire. Elles intéressent souvent la région D3 à D8 mais également la région cervicale. Il s'agit alors de fractures communitives ou de fractures luxations qui répondent aux mécanismes II et III de WATSON-JONES. Les complications neurologiques ne sont pas rares.

Les observations suivantes illustrent ce type de fracture :

Pilote sur Alouette 2 : En vol horizontal (croisière) l'arbre de transmission du rotor de queue se rompt et le système anticouple disparaît. Le crash avec rotation en vrille, turbine non coupée se déroule sur un terrain particulièrement difficile (montagne). Le pilote a 2 fractures intéressant L2 et L3. Une paraplégie flasque traumatique apparaît rapidement.

Instructeur pilote et élève pilote : sur Bell Jet Ranger 206 B cité par SNYDER (232)

Après une défaillance mécanique suivie d'une perte de puissance à environ 260 m d'altitude, l'appareil chute dans une forêt de pins et tombe d'un arbre. Malgré les dégâts matériels, les pilotes sont très grièvement blessés. Le pilote instructeur présente une fracture luxation de L1, avec compression de la moëlle épinière qui a entraîné une paralysie des membres inférieurs. Etant donné les autres polytraumatismes vertébraux (fractures des apophyses transverses de L1-L2-L3-L4) et d'un enfoncement thoracique, le blessé ne survécut pas à ses blessures. L'élève pilote est victime de polyfractures vertébrales (fracture du corps vertébral de L3 et des apophyses transverses de L2-L3 et L4) et de lésions internes. Il réussit à survivre mais garda une paraplégie.

Pilote sur Bell 47 G : Lors d'une tentative d'atterrissage sur une Dz montagneuse difficile à 2115 mètres d'altitude, l'hélicoptère heurte violemment des rochers. Les angles du pilote rompues à l'impact sont coupées net. Le pilote a 2 fractures (D3 et D4).

Dans ces deux derniers, par suite de rupture des attaches de siège et des sangles du harnais, le choc s'est produit directement par projection sur des obstacles.

Le sanglage en cas de crash joue un rôle important. Bien qu'étant incapable d'empêcher la fracture vertébrale de se produire, elles évitent au pilote de se heurter contre la partie avant de l'habitacle du poste de pilotage (voir chapitre 5-3-1)

Les fractures de la colonne cervicale basse (C5-C7) ne sont pas rares. La plupart sont dues à un mécanisme type whip lash (coup de fouet) ou à des chocs directs. L'étude radiologique systématique post-mortem du rachis de pilotes et de passagers d'hélicoptères nous a montré la grande fréquence des atteintes C5-C6 de type fracture luxation.

CONCLUSION

Les moyens de protection contre les accidents d'hélicoptères nécessitent des recherches pour diminuer le risque d'accident mortel en hélicoptère, 0,34 pour 10.000 heures de vol et en avion, 0,94 pour 10.000 heures de vol. Comparativement l'avion est beaucoup mieux adapté au crash : composante horizontale du choc plus importante, nombreuses structures défavorables, pour le pilote possibilité de contrôle de l'appareil et d'évacuation en vol (parachute, siège éjectable). Des recherches sont donc nécessaires pour améliorer les conditions de crash des hélicoptères

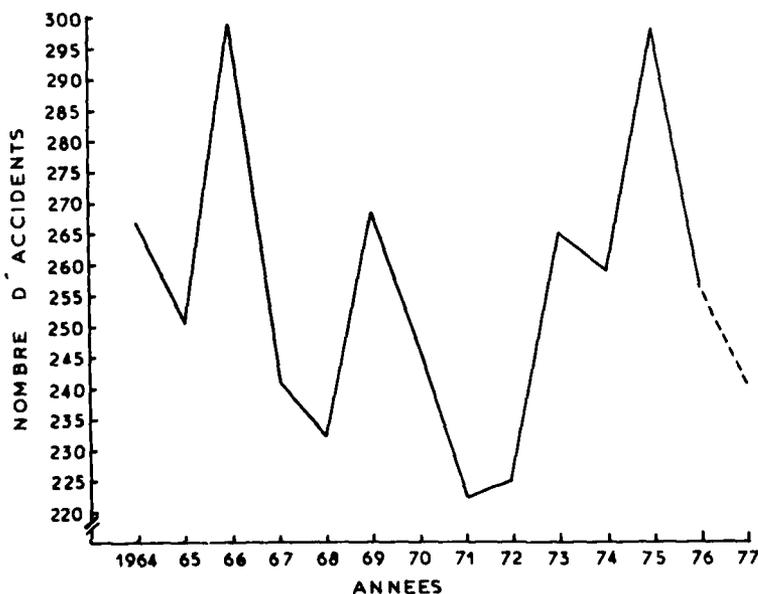


Figure 59 : Répartition des accidents d'hélicoptères civils aux U.S.A.
d'après R.G. SNYDER (232)

5.3.3. EJECTION DES PILOTES D'AVIONS DE COMBAT

R.P. DELAHAYE, R. AUFFRET, B. VETTES

S O M M A I R E

- 5.3.3.1. Introduction et historique
- 5.3.3.2. Principe du siège
- 5.3.3.3. Description des différentes phases de l'éjection
 - 1. La préparation
 - Utilisation commande haute
 - Utilisation commande basse
 - 2. La mise à feu du siège et le départ de l'ensemble siège-pilote
 - 3. L'abandon du siège
 - 4. L'atterrissage
 - 5. Phase de survie - Secours.
- 5.3.3.4. Des différents types d'éjections
 - 1. Configurations normales
 - 2. Configurations anormales
 - 3. Extraction (système Y E S)
- 5.3.3.5. Résultats des éjections
 - 1. Résultats globaux
 - 2. Résultats en fonction des facteurs du vol.
- 5.3.3.6. Répartition des lésions de l'éjection
 - 1. Fractures du rachis
 - 2. Lésions autres que les fractures du rachis
- 5.3.3.7. Mécanisme physiopathogénique des fractures du rachis au cours de l'éjection
 - 1. Mécanisme au départ du siège
 - Rôle de la position du pilote
 - Rôle du sanglage
 - Angle inclus
 - Facteurs divers
 - 2. Ejection en configurations anormales
 - 3. Transmission des accélérations à l'ensemble siège-pilote. Importance du coussin
 - 4. Ejections à travers verrière
- 5.3.3.8. Choc à l'ouverture du parachute
- 5.3.3.9. Atterrissage

Ejections have not been a panacea.
However, they are complicated experiences
and encompass a myriad of problems.

Major W.D. HARRISON

U.S.A.F. (127)

5.3.3.1. Introduction et Historique

Avant la fin de la guerre 1939-1945, des travaux scientifiques allemands d'une part, américains et anglais d'autre part, démontrent que le sauvetage des pilotes à grande vitesse devient très aléatoire. Une grande proportion de blessés et de morts s'observe au cours de l'évacuation des avions de combat. La collision du pilote avec l'empennage de l'avion à partir de 300.400 km/h est souvent responsable de ces accidents.

La plupart du temps, le pilote ne peut, en raison de la vitesse quitter lui-même son appareil. L'éjection par siège propulsé est le seul mode d'évacuation de la cabine de pilotage au delà d'une certaine vitesse.

Dès 1939, les premières études chez HEINKEL s'effectuent sur rampe avec des mannequins, ensuite avec des hommes. BUSCH, parachutiste d'essai, réussit les premières éjections à partir d'une vitesse de 300 km/h. Ces essais aboutissent en 1944 au montage en série du siège éjectable Heinkel sur le chasseur à réaction Heinkel (He 162) et sur le biréacteur Messerschmitt 262. A la fin de la 2^e Guerre Mondiale, 60 éjections observées dans la Luftwaffe permettent de recueillir un certain nombre de données très intéressantes (22).

En Suède, en 1942, on réussit l'éjection d'un mannequin à partir d'un bombardier SAAB 17 B de l'Armée de l'Air suédoise. En 1943, le premier siège éjectable de série est monté sur le chasseur à hélice propulsive SAAB J 21 A. La première éjection humaine survient (29 Juillet 1946) à la suite d'une collision aérienne.

En Grande Bretagne, sur un avion du type Defiant modifié, la première réussite d'une éjection avec mannequin a lieu le 11 Mai 1945. B. LYNCH, parachutiste d'essai, s'évacue le 26 Juin 1946 d'un Gloster Meteor équipé d'un siège Martin Baker à une vitesse de 515 km/h (22).

L'U.S. Navy utilise pour débiter des sièges anglais Martin Baker et la première éjection par le Lieutenant FURTEK est observé en novembre 1946. L'U.S.A.F. emploie un siège mis au point par l'Aircraft Laboratory et le 17 Août 1946, le Sergent LAWRENCE Lambert s'éjecte (22).

C'est seulement en février 1948 que le parachutiste d'essai Robert CARTIER réalise, à Chalgrove (G.B.) la première éjection d'un français à partir d'un avion Gloster Meteor équipé d'un siège Martin Baker (22).

Depuis 1946, plus de 10.000 éjections ont été enregistrées dans le monde (dont plus de 4.400 dans l'U.S.A.F.).

5.3.3.2. Principe du siège (fig. 63 et 65) (2)(45)(52)(70)(73)(83)(106).

Afin d'éviter que le siège et son occupant n'entrent en collision avec une partie arrière de l'avion, il faut leur imprimer une vitesse d'autant plus grande que celle de l'avion sera plus élevée et que les dimensions de l'empennage plus importantes.

La vitesse du siège au moment de la séparation doit être au minimum de 17 à 18 mètres par seconde.

Pour obtenir l'accélération qui permet au siège d'atteindre la vitesse désirable, compte tenu du temps très court imparti, on emploie la pression des gaz de combustion d'une ou plusieurs cartouches de poudre. La combustion se produit dans un canon dont une partie est fixée à l'avion, la deuxième étant éjectée avec le siège.

Les accélérations sont de 20 à 21 G pendant une durée de 8 à 10 centièmes de seconde avec les canons simples, de 16 à 17 G avec les sièges à canon télescopique pour une durée de 18 à 20 centièmes de seconde.

Actuellement, pour augmenter le temps de l'accélération et obtenir ainsi une vitesse plus importante du siège sur sa trajectoire, on utilise des sièges à fusée. Sur ce type de siège, après la combustion des cartouches à poudre, intervient la mise à feu de la fusée qui augmente d'autant l'apogée de la trajectoire. En effet, cette fusée crée en moyenne une accélération de 10 à 15 G pendant une durée supplémentaire de 20 centièmes de seconde. Ce temps permet en outre une éjection dite O-O

Poids éjecté : siège + pilote = 172 kg.

----- Siège standard MK4

————— Siège fusée AM6

Accélération max. = 20 g
Vitesse siège = 80 ft/sec.
Pente d'accélération = 240 g/sec.

Accélération max. = 15 g
Vitesse siège = 160 ft/sec.
Pente d'accélération = 200 g/sec.

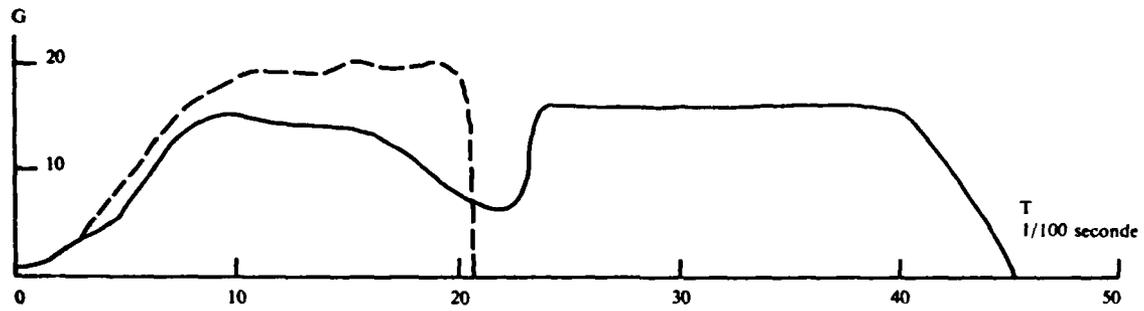


Figure 60 : Accélération en fonction du temps
Ejection à l'aide de 2 sièges différents (standard MK4 et fusée AM 6)

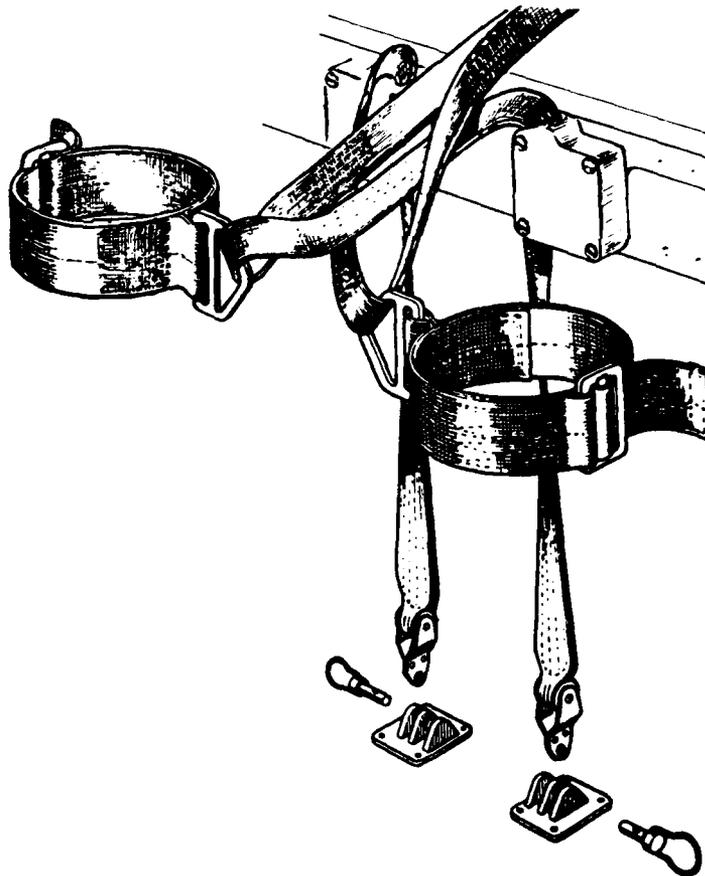
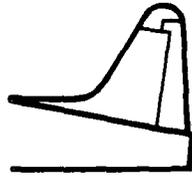
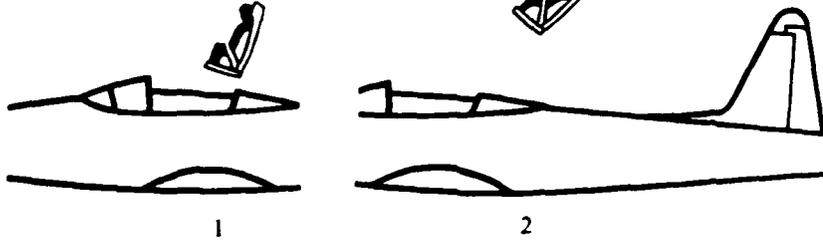


Figure 62 : Dispositif de rappel de jambe.

Différentes phases de l'éjection



3

Phases successives de l'évacuation par siège éjectable.

1. Départ du siège
2. Ascension du siège
3. Passage du siège au-dessus de l'empennage
4. Ouverture automatique du parachute du siège
5. Débouclage automatique du pilote
6. Séparation siège-pilote
7. Ouverture automatique du parachute du pilote.

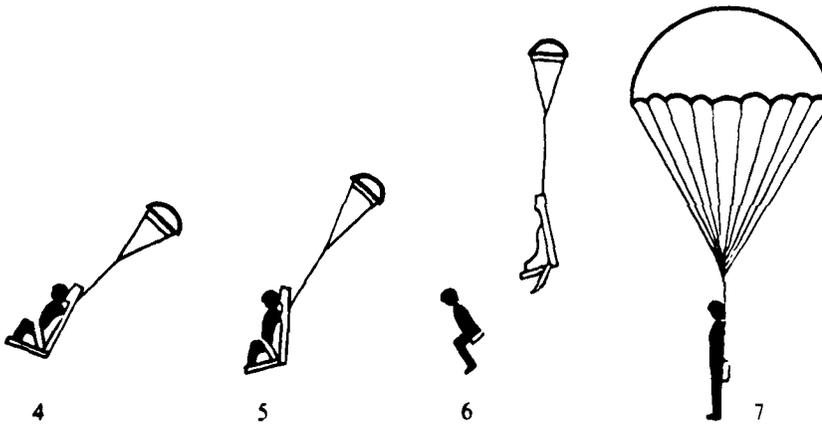


Figure 61 : Différentes phases successives de l'évacuation par siège éjectable - d'après (52)

(c'est à dire à altitude 0 et à vitesse 0). En effet, l'apogée de la trajectoire d'éjection est suffisamment haute pour permettre le déploiement du parachute même sans vitesse horizontale initiale de l'avion.

Le départ du siège éjectable peut être déclenché soit par une commande haute, soit par une commande basse.

5.3.3.3. Description des différentes phases de l'éjection (42) (52) (70) (100)

L'éjection comporte différentes phases (fig. 61) :

- la préparation,
- la mise à feu du siège et le départ de l'ensemble siège-pilote,
- l'abandon du siège,
- l'atterrissage,
- la phase de survie et de secours.

1. La préparation

Le respect des consignes d'éjection résulte d'automatismes acquis au cours de l'entraînement dans les cabines de pilotage ou les simulateurs. La connaissance parfaite des gestes à effectuer ne suffit pas car toutes les manoeuvres doivent être réalisées dans un temps très court. Le stress ralentit la vitesse de réaction chez certains pilotes et peut même entraîner l'inaction complète. On insiste sur un facteur important retardant le déclenchement de l'éjection : la forte motivation du pilote à contrôler l'avion jusqu'au dernier instant pour éviter la perte de population civile au sol ou pour ramener un prototype dont la perte s'avérerait particulièrement grave pour un programme d'essais. Harrison (127) constate que dans plusieurs éjections, le pilote n'a pas utilisé le temps disponible pour se placer correctement. Dans toutes les Armées de l' Air, des accidents graves et même des décès ont été observés chez des pilotes répuant à utiliser leur siège éjectable parce que leur endoctrinement était insuffisant.

Actuellement, les pilotes d'avions de combat ont confiance dans le siège éjectable. Les procédures ont été simplifiées avec l'automatisme des différentes séquences. Quelque soit le degré de perfectionnement de la technologie du siège, les risques léthaux continueront à exister. Les pilotes doivent être parfaitement entraînés et connaître les procédures à appliquer.

Si le temps le permet, le pilote correctement sanglé, baissera la visière de son casque, réglera le siège éjectable à la position étudiée préalablement au sol. Il devra laisser les pieds sur le palonnier sur les sièges disposant d'un rappel de jambes (fig. 62).

Pour le siège MARTIN-BAKER A.M.4., le plus couramment utilisé dans l' Armée de l' Air Française, le pilote se rappellera qu'il s'écoule une seconde entre l'action sur la commande de l'éjection et le départ du siège. Dans les systèmes de nouveaux avions (Jaguar par exemple), ce temps est réduit à 0,4 seconde.

a) Utilisation de la commande haute (fig 63 et 64)

C'est une commande encore fréquemment utilisée dans plusieurs Armées de l' Air. Il s'agit d'un rideau en toile ou en nylon, placé à la partie supérieure du siège, que le pilote doit tirer avec les deux mains, paumes tournées vers le visage, les bras restant sensiblement parallèles. L'effort de traction doit être voisin de 25 décanewtons (25 da N). pour déclencher le processus d'éjection. Ce rideau permet au pilote de prendre une bonne position. De plus, il protège la face et le masque à oxygène contre les effets du vent relatif. La tête est maintenue contre l'appui-tête. Le pilote ne doit pas baisser la tête pour tirer le rideau.

Sans modifier l'angle formé par les avant-bras et les bras, il effectue une traction franche par simple rotation vers le bas, autour de l'axe des épaules. Les avant-bras viennent sur le thorax et maintiennent fermement le rideau. Les bras sont fortement plaqués le long du corps.

b) Utilisation de la commande basse (fig 65)

Cette commande doit être employée dans les cas suivants :

- non fonctionnement de la commande haute,
- impossibilité d'accéder à la commande haute (fortes accélérations + Gz)

Le gain de temps de la commande basse par rapport à la commande haute est théoriquement de l'ordre de 0,15 seconde. Mais l'effort de traction doit être supérieur à 40 da N (40 kg) et être soutenu pendant une seconde. Du fait de l'absence de rideau, l'action de la commande basse n'est pas favorable en cas de vitesse élevée au moment de l'éjection. Le corps doit être bien plaqué contre le siège, la tête bien maintenue contre l'appui-tête, les fesses bien enfoncées. Le pilote ne doit pas pencher la tête pour regarder la poignée de la commande basse.

D'une main, paume tournée vers l'intérieur, le pilote tire la

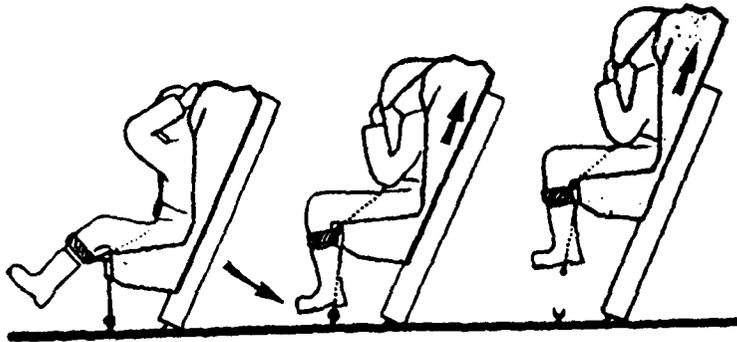


Figure 63 : Déclenchement de l'éjection (commande haute)

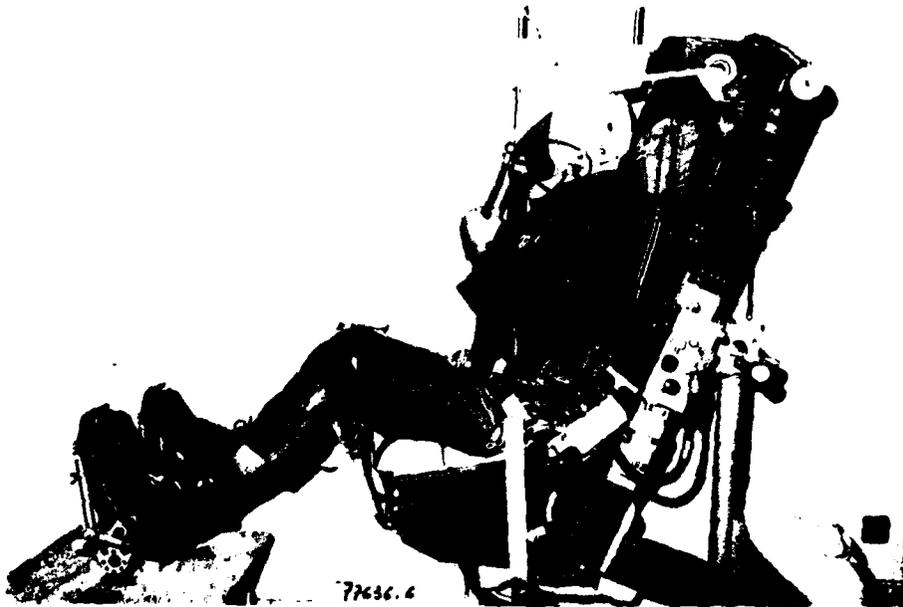


Figure 64 : Départ du siège éjectable (déclenchement par rideau)

poignée de commande basse. L'autre main enserre le poignet opposé. Les coudes au corps, il faut tirer les avant-bras vers le haut.

Beaucoup d'avions de chasse ne possèdent qu'une poignée basse, parfois placée dans l'accoudoir. Le mode d'initiation de l'éjection et son influence sur le taux d'apparition des lésions vertébrales ont fait l'objet, dans la littérature aéromédicale, de controverses passionnées.

2. La mise à feu du siège et le départ de l'ensemble siège-pilote (fig. 60)

Le siège propulsé par la mise à feu de cartouches est projeté vers le haut. Son départ provoque la percussion d'une cartouche qui éjecte une petite masse métallique reliée au parachute stabilisateur.

La première phase du départ du siège est guidée par les rails et les canons successifs. Dès que l'ensemble siège-pilote est soumis au vent relatif et à sa dynamique propre, on observe des mouvements de rotation vers l'avant si la vitesse est faible (inférieure à 200 noeuds), vers l'arrière si la vitesse est plus importante. De même, il existe une rotation latérale. Certains sièges tournent vers la gauche, d'autres vers la droite.

On essaie de stabiliser sur un axe donné, la trajectoire suivant la sortie de l'avion à l'aide d'un parachute stabilisateur.

Dans le siège à fusée on détermine par calcul le centre de poussée de la fusée sur l'ensemble siège-pilote. Les rotations du siège et du pilote dépendent des positions relatives, du centre de poussée de la fusée et du centre de gravité de l'ensemble.

Le siège stabilisé par le parachute s'éloigne de l'avion. Sa vitesse diminue régulièrement pour atteindre la vitesse de chute libre. Le temps de descente pour un siège Martin Baker M.K. 4, avec parachute stabilisateur est :

1 mn 30 s. de 60.000 pieds (18.288 m) à 36.000 pieds (10.972 m)

2 mn 30 s. de 36.000 pieds (10.972 m) à 10.000 pieds (3.048 m)

3. L'abandon de siège

Sur les premiers sièges, le pilote devait lui-même se séparer de son siège, Cinq à dix secondes après l'éjection, le pilote se détachait pour abandonner le siège. Le siège délesté et freiné par le parachute stabilisateur, s'éloignait rapidement du pilote qui tombait en chute libre. L'ouverture du parachute était alors commandée manuellement.

Actuellement, divers perfectionnements ont rendu automatiques le largage du siège et l'ouverture du parachute améliorant notamment la sécurité (fig. 68).

Nous envisagerons deux types d'abandons de bord :

- à haute altitude, le pilote descend sur son siège stabilisateur jusqu'à 10.000 pieds (3048 mètres). A cette altitude, une capsule barométrique provoque la séparation du siège et du pilote et simultanément le déclenchement de la séquence d'ouverture.

- à basse altitude et à grande vitesse, un accéléromètre contrôle ^{la} décélération. Cette dernière doit être inférieure à 4 G pour que l'ouverture du parachute principal ait lieu. En effet, l'ouverture prématurée de ce dernier entraînerait la création de décélérations trop importantes non compatibles avec la résistance du corps humain et surtout avec la solidité du parachute.

Le temps de descente pour un pilote éjecté, parachute ouvert est :

7 minutes de 10.000 pieds (3.048 m) au sol,
19 minutes de 36.000 pieds (10.972 m) au sol,

solution à ne pas conseiller à cause du froid ambiant, de la petite réserve d'oxygène de secours et de la décélération importante créée par l'ouverture du parachute à haute altitude, donc à grande vitesse de chute libre (fig. 66 et 67)

4. L'atterrissage

Pendant la descente, le pilote a le temps de penser et d'analyser sa situation. Actuellement, les tâches qui s'offrent à lui sont nombreuses :

- inspection et vérification du parachute pour détecter ses dégâts ou pour le régler (s'il existe des dispositifs appropriés).



Figure 65 : Départ de l'éjection par commande basse.

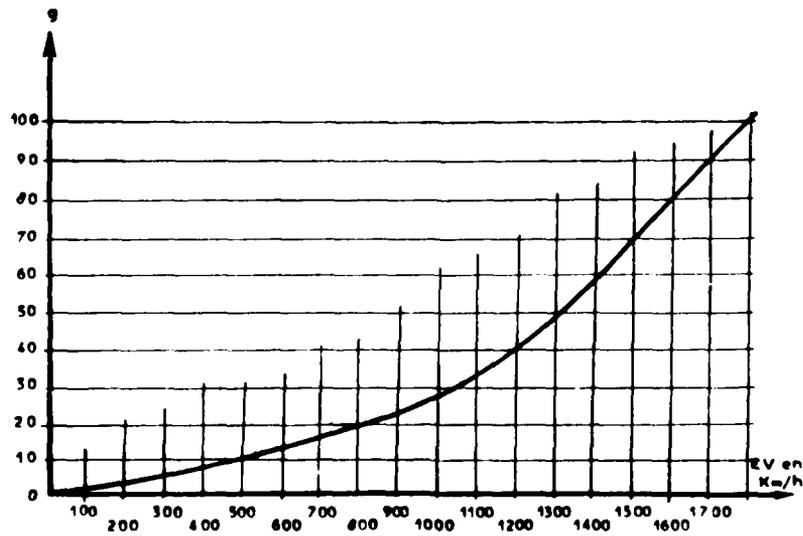


Figure 66 : Pic maximal de la décélération en fonction de la vitesse équivalente (E.V.) pour un ensemble de 6,6 m² de surface frontale et d'un poids de 150 Kg.
(d'après MOHRLOCK)

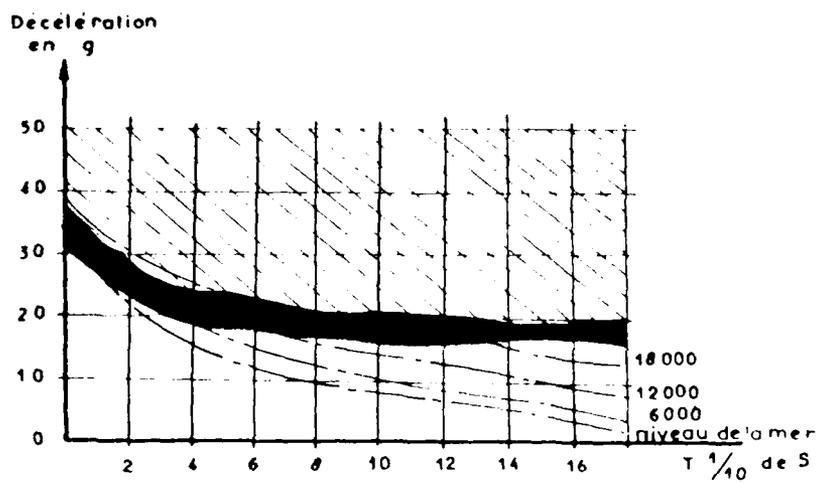


Figure 67 : Taux de décroissance de la décélération en fonction du temps

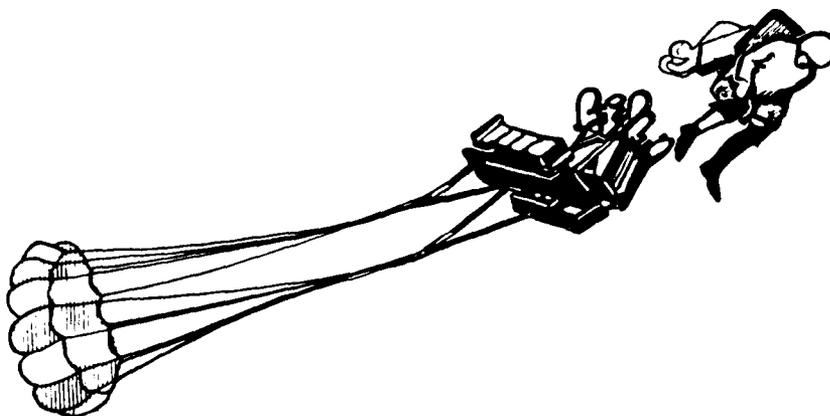
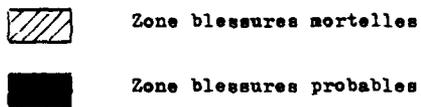


Figure 68 : Séparation siège-pilote (d'après document U.S.).

- dégrafer le masque à oxygène à basse altitude.

- avant l'arrivée au sol ou en mer, dans les cinq cents derniers mètres, le pilote ouvre le paquetage comprenant en particulier un canot qui se gonfle automatiquement. Ce dinghy reste relié au pilote par une sangle de cinq mètres de long. Dans les derniers systèmes d'évacuation cet ensemble est suffisamment indépendant du pilote pour que son esprit ne soit pas occupé par cette manoeuvre de dernière minute. Cette amélioration diminuera certainement le nombre de fractures vertébrales des pilotes éjectés car l'analyse des statistiques démontre la plus grande fréquence du tassement vertébral chez les pilotes qui n'ont pas pensé à larguer leur paquetage. L'explication est simple ; la masse de l'ensemble survie représentant en moyenne 8 à 10 kilogrammes qui s'ajouteront à la masse pilote lors de l'impact au sol.

Le pilote arrive au sol dans des conditions particulièrement différentes de celles du parachutiste professionnel. Le personnel navigant est peu entraîné à la pratique du parachutisme. Dans certaines Armées de l' Air, les élèves pilotes sautent parfois avant leur brevet pour se familiariser avec les conditions d'arrivée au sol. Cependant, tous les pays ne pratiquent pas ce style d'entraînement discutable par ailleurs, car il risque d'entraîner des pertes dues aux lésions du rachis et des membres inférieurs chez un personnel coûteux. D'autre part, l'éjection se produit souvent très longtemps après cette période d'entraînement. Le pilote éjecté ne choisit ni le moment du sauvetage ni le terrain. Les sauts de nuit, par vents violents, les arrivées sur des terrains accidentés, dans les forêts, ne sont pas rares. Les arrivées sur l'eau, si le pilote a perdu connaissance, entraînent la noyade.

Le parachute, généralement utilisé, a une surface de voilure réduite (40 m² au lieu de 60 m² dans les troupes aéroportées françaises). La vitesse d'arrivée est donc plus grande que celle d'un parachutiste confirmé (34) (52).

Il faut insister sur certains facteurs psychologiques. Le déroulement automatique des différentes séquences de l'éjection rassure le pilote qui est souvent stimulé, détendu. Le problème de l'atterrissage, après les conditions souvent tumultueuses pour certains pilotes, paraît secondaire.

5. Phase de survie secours

En temps de paix, le sauvetage est rapide, conditionné par l'observation aérienne et le repérage généralement par un équipier et par l'emploi de l'hélicoptère. Dans plus de 65% des cas, le pilote éjecté est récupéré en moins de 2 heures.

En période d'hostilités, la tactique suivie pour retrouver et secourir le pilote éjecté varie en fonction du temps (pluie, neige, vent), de l'efficacité des communications radio, de la capacité de survie du pilote et de la proximité de l'ennemi (Harrison) (127).

5.3.3.4. Les différents types d'éjections (9)(52)(70)

1. Ejections en configurations normales de l'avion :

L'avion est en vol rectiligne avec une trajectoire voisine de l'horizontale et avec un facteur de charge voisin de 1, le pilote assis correctement sur son siège au moment de l'éjection. Toutes les autres configurations sont anormales.

2. Ejections en configurations anormales de l'avion :

L'attitude de l'avion peut être modifiée. Parfois l'éjection se produit, l'avion étant sur le dos ou sur la tranche. Les pertes de contrôle avec vitesse de rotation importante en roulis ne sont pas rares. Les accélérations peuvent être linéaires, circulaires, angulaires. Dans ces configurations, seul le harnais maintiendra le pilote sur le siège. Le dos risque de ne pas être appliqué contre le dossier, la main du pilote ne sera pas toujours en contact avec le coussin du siège. De ce fait, la dynamique de l'éjection sera modifiée.

En virage serré, l'accélération engendrée par la manoeuvre s'ajoute à l'accélération du siège. En vrille sur avion moderne, l'accélération - Gx développée par la rotation de l'avion projette le pilote en avant dans son harnais. Les points d'ancrage de ce harnais étant bas situés, le rachis se trouve en flexion forcée. Cette modification de la courbure rachidienne favorisera l'apparition de fractures du rachis au moment de l'impact au siège.

Ces observations permettent de rappeler ce que doit être la position du pilote au moment de l'éjection :

- Les pieds bien appliqués sur le siège,
- Les mains serrées sur les poignées de la barre de commande,
- Les jambes bien appliquées sur le siège, les pieds serrés, les serre-jambes, peuvent rester sur le palonnier.
- Le coussin du siège doit être appliqué contre le dossier. Il est impératif de les ramener sur les étriers.
- Le dos doit être appliqué contre le dossier au moment de l'éjection.
- La tête doit être appliquée contre le dossier.
- La courbure de la colonne vertébrale doit être maintenue. Elle doit être choisie avec le plus grand soin pour éviter de modifier la courbure de la colonne vertébrale.
- Les pieds doivent être appliqués sur le siège.
- Les mains serrées sur les poignées de la barre de commande.
- Les jambes bien appliquées sur le siège, les pieds serrés, les serre-jambes, peuvent rester sur le palonnier.
- Le coussin du siège doit être appliqué contre le dossier. Il est impératif de les ramener sur les étriers.
- La tête doit être appliquée contre le dossier.
- La courbure de la colonne vertébrale doit être maintenue. Elle doit être choisie avec le plus grand soin pour éviter de modifier la courbure de la colonne vertébrale.
- Les pieds doivent être appliqués sur le siège.
- Les mains serrées sur les poignées de la barre de commande.
- Les jambes bien appliquées sur le siège, les pieds serrés, les serre-jambes, peuvent rester sur le palonnier.
- Le coussin du siège doit être appliqué contre le dossier. Il est impératif de les ramener sur les étriers.
- La tête doit être appliquée contre le dossier.
- La courbure de la colonne vertébrale doit être maintenue. Elle doit être choisie avec le plus grand soin pour éviter de modifier la courbure de la colonne vertébrale.
- Les pieds doivent être appliqués sur le siège.
- Les mains serrées sur les poignées de la barre de commande.
- Les jambes bien appliquées sur le siège, les pieds serrés, les serre-jambes, peuvent rester sur le palonnier.
- Le coussin du siège doit être appliqué contre le dossier. Il est impératif de les ramener sur les étriers.
- La tête doit être appliquée contre le dossier.
- La courbure de la colonne vertébrale doit être maintenue. Elle doit être choisie avec le plus grand soin pour éviter de modifier la courbure de la colonne vertébrale.
- Les pieds doivent être appliqués sur le siège.
- Les mains serrées sur les poignées de la barre de commande.
- Les jambes bien appliquées sur le siège, les pieds serrés, les serre-jambes, peuvent rester sur le palonnier.
- Le coussin du siège doit être appliqué contre le dossier. Il est impératif de les ramener sur les étriers.
- La tête doit être appliquée contre le dossier.
- La courbure de la colonne vertébrale doit être maintenue. Elle doit être choisie avec le plus grand soin pour éviter de modifier la courbure de la colonne vertébrale.

dans les Armées de l' Air de l' OTAN, démontrent que la perte du casque au cours des différentes phases de l'éjection est un facteur défavorable entraînant une augmentation des lésions traumatiques du crâne.

Les éjections sous l'eau qui posent des problèmes très difficiles traités par DAVIDSON (46) n'ont pas entraîné à notre connaissance l'apparition de fractures du rachis chez les pilotes survivants de l'aéronavale française.

3. Extraction (70)

Depuis 1966 la firme STANLEY aux Etats-Unis a étudié un système permettant non plus " l'éjection " du siège par poussée d'un canon relayé éventuellement par la combustion d'une fusée sous le siège, mais " l'extraction " du siège hors de l'habitacle. Schématiquement ce système Y E S (Yankee Escape System) fonctionne de la façon suivante :

Après départ de la verrière un bloc de deux fusées est expulsé pneumatiquement vers le haut en entraînant une drisse d'environ 3 mètres, attachée à la partie supérieure des sangles du pilote. Lorsque ce câble est tendu, les deux fusées à jet divergent s'allument et entraînent l'ensemble " pilote-dossier du siège " vers le haut. La partie horizontale du siège se rabat, de sorte que le pilote sort " allongé de l'habitacle " (un " booster " pneumatique peut d'ailleurs accélérer le départ du siège vers le haut). La traction des fusées favorise le déploiement " à la traine " du parachute même en cas d'éjection à vitesse nulle ou d'abandon de bord en direction du sol ; l'accélération encaissée par le pilote est seulement de l'ordre de 12 G, mais ce système ne semble pas, pour le moment, être utilisable en cas d'éjection à grande vitesse.

Ce système Y E S est très utilisé dans de nombreuses Armées de l' Air.

5.3.3.5. Résultats des éjections (9)(33)(35)(41)(67)(92)(93)(107)(127)(144)(176)(178)(191)(197)(215)(224)(225)(226).

1. Résultats globaux

Nous appelons éjections manquées toute éjection entraînant la mort du pilote. Par éjections réussies, nous comprenons celles où le pilote est indemne de même que celles où des blessures graves ou légères sont observées.

Nous disposons de deux statistiques :

- Une provenant de l' Armée de l'Air française réunissant toutes les éjections de 1955 à 1979 inclus, avec des sièges non automatiques et des sièges entièrement automatiques (tableau 5-8) (50)(52)(73)

- Une O.T.A.N. intéressant 678 éjections sur sièges modernes automatiques. Un seul mode d'utilisation (commande haute ou basse, accoudoirs) déclenche le déroulement automatique de l'ensemble des séquences de l'éjection (tableau 5-9)(9)

Nombre total d'éjections	Ejections manquées (décès)	Ejections réussies
429	93	336
	21,67%	78,33%

Tableau 5-8 : Ejections Armée de l' Air Française
(1955- 1979 inclus)
Sièges non automatiques et sièges
automatiques

: Nombre total d'éjections :	Ejections manquées :	Ejections réussies :
	(décès)	
: _____ :	_____ :	_____ :
: 678 :	114 :	564 :
: _____ :	_____ :	_____ :
: _____ :	16,81% :	83,19% :

Tableau 5 -9 : Statistique du groupe de travail(9)

Spinal Injury after Ejection Diagnosis and Follow up (Président : Médecin Général GIBERT, Coordinateurs : Médecins en Chef AUFFRET et DELAHAYE) portant sur des éjections avec sièges automatiques de l' U.S. Air Force U.S. Army, French Air Force, Royal Air Force, Germain Air Force, Italian Air Force, Hellenic Air Force.

Malgré le développement des différentes techniques le taux de succès n'a pas augmenté de façon appréciable depuis une dizaine d'années (Harrison) U.S.A.F. (127).

Le nombre de décès en temps de paix reste important, même avec les sièges entièrement automatiques. La vitesse trop élevée dans les conditions actuelles d'utilisation des sièges éjectables est génératrice de lésions très graves entraînant souvent le décès du pilote.

2. Résultats en fonction des facteurs du vol (altitude, vitesse)

- Altitude -

En cas d'éjection en altitude basse et à très grandes vitesses, le pourcentage des décès est très important. Les résultats ne sont nettement améliorés avec l'automatisme des différentes séquences. Les vrilles à basse altitude compromettent souvent la réussite de l'éjection. De même, dans les grandes vitesses, l'effet frein du parachute stabilisateur du siège n'a pas toujours la possibilité de s'exercer. Rappelons que les conditions idéales de l'éjection sont : altitude de 15.000 pieds (4.569 m) et vitesse comprise entre 250 et 300 noeuds.

- Vitesse -

La plupart des éjections se produisent à des vitesses corrigées comprises entre 100 et 500 noeuds. Au-dessus de 500 noeuds, le pourcentage de décès dépasse 40%. La vitesse corrigée constitue un facteur aggravant et toutes les statistiques publiées insistent sur l'augmentation des lésions (fractures en particulier), des décès avec la vitesse. Les grandes vitesses diminuent les chances d'une bonne éjection (37)(52)(94).

5.3.3.6. Répartition des lésions de l'éjection chez les pilotes survivants.

1. Les fractures du rachis : Ce sont les lésions graves les plus fréquentes et malgré tous les progrès récents observés dans la technologie des sièges éjectables, les fractures du rachis demeurent d'après l'avis de tous les spécialistes (ingénieurs, médecins, parachutistes d'essais) le problème N° 1 de l'éjection. (9)(33)(35)(41)(52)(59)(69)(74)(78)(85)(90)(91)(107)(111)(113)(114)(124)(130)(134)(135)(136)(141)(144)(158)(164)(166)(183)(191)(195)(196)(197)(214)(216)(224)(225)(226)(237)(238).

Nous disposons de 2 statistiques (l'une intéressant toutes les éjections de l' Armée de l' Air Française, l'autre de l' OTAN).

: Nombre d'éjections :	Nombre de pilotes :	Nombre de fractures :
	ayant fractures	observées
: _____ :	_____ :	_____ :
: 429 :	51 :	77 F.A.F. :
: 678 :	92 :	216 O.T.A.N. :

Tableau 5-10

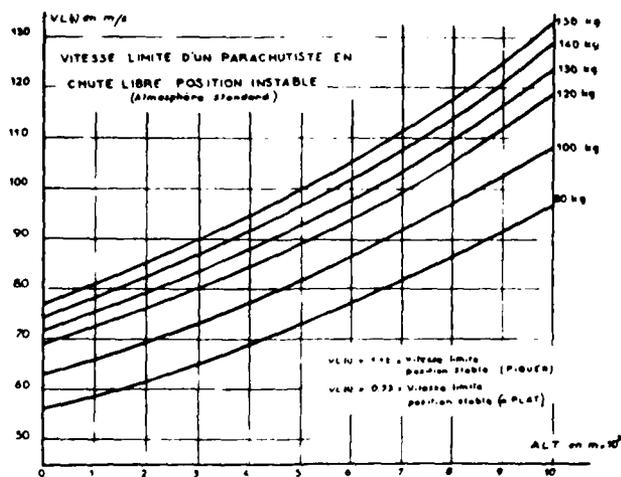


Figure 69 : Vitesse limite d'un parachutiste en chute libre en fonction de son poids et de sa position.

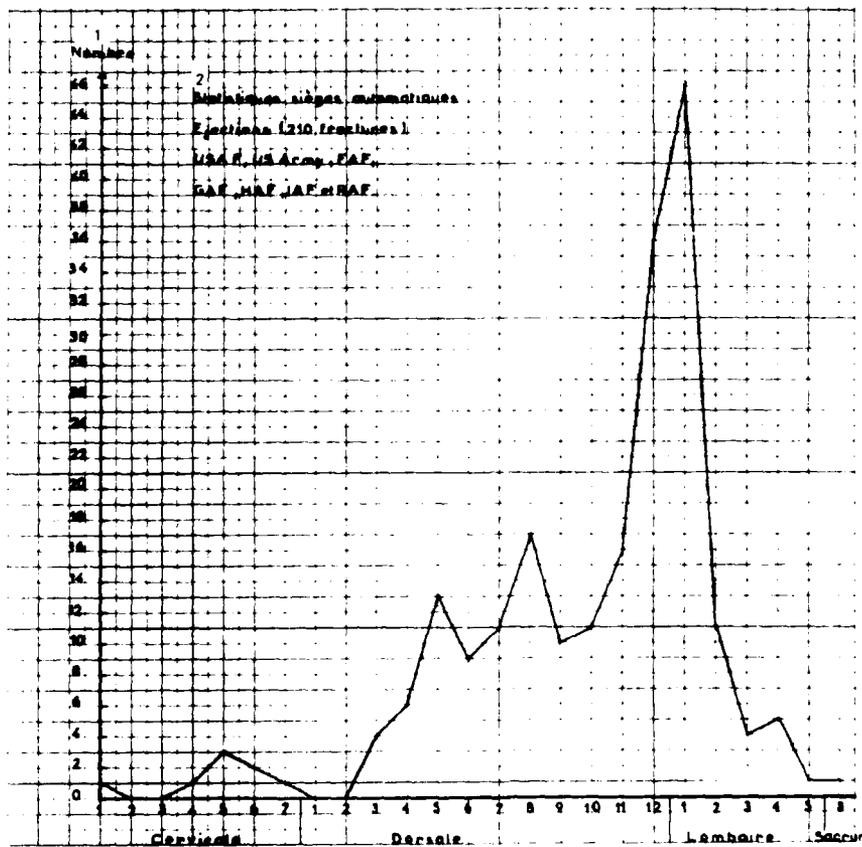


Figure 70 : Statistiques Working Group Spinal injury after ejection.

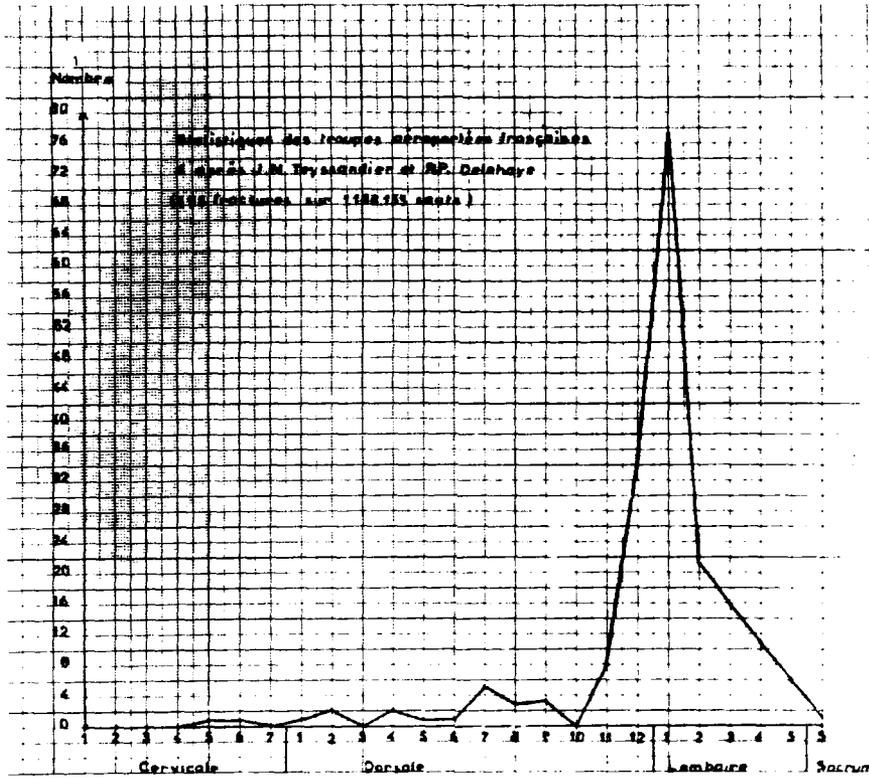


Figure 71 : Statistique des troupes aéroportées françaises d'après M.J. TEYSSANDIER et R.P. DELAHAYE (240)

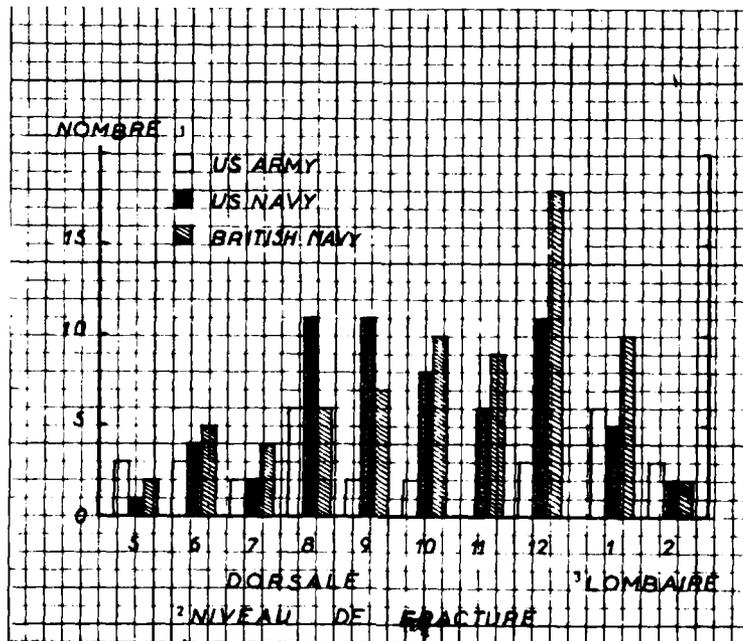


Figure 72 : Fractures du rachis avec le même type de siège MKJ 5 dans différentes armées : US Army, US Navy, British Navy (9)

Nous étudierons plus particulièrement la statistique de l' O.T.A.N. qui comprend les résultats observés dans 7 Armées de l' Air : U.S. Air Force, U.S. Army, Armée de l' Air Française, Germain Air Force, Italian Air Force, Hellenic Air Force, Royal Air Force.

Nous disposons donc d'un total de 216 fractures apparaissant chez 130 pilotes ayant été éjectés (sièges automatiques) ces dernières années (tableau 5-11).

Cette répartition (fig. 70) montre qu'il existe :

- un pic important au niveau de D12-L1 (37% des localisations)
- une grande fréquence des fractures de la colonne dorsale (plus de la moitié de l'ensemble des fractures du rachis après éjection).

Ces faits corroborent les données recueillies après examen des statistiques concernant les accidents traumatiques de la pratique civile (voie publique accidents de travail ou sports). Dans les éjections, il est difficile, voire impossible, de préciser le moment d'apparition de la fracture de la colonne vertébrale, soit au départ du siège éjectable, soit à l'arrivée au sol.

Il nous est cependant permis de comparer 2 statistiques :

- celles de l'éjection de forces armées de l' O.T.A.N. dans laquelle sont comprises les fractures survenant au départ du siège et à l'atterrissage.
- celles des fractures des troupes aéroportées françaises intéressant 1.181.155 sauts (195 fractures) (fig.71)

D'une comparaison grossière des 2 courbes, il apparait certain que les accélérations au départ du siège sont susceptibles d'entraîner l'apparition des fractures s'étageant sur l'ensemble de la colonne dorsale ou lombaire. Par contre, en traumatologie du parachutisme, les fractures prédominent au niveau de la seule charnière dorso-lombaire.

Les fractures multiples chez les pilotes éjectés s'observent souvent (40 pilotes sur 92, soit 40,8%). Remarquons que le fait d'observer des fractures multiples de la colonne vertébrale ne constitue pas obligatoirement un facteur de gravité (9)

Tableau 5-11 : Statistique OTAN (216 fractures)
Groupe de Travail 1974
Spinal Injury after Ejection (OTAN)(9)

VERTEBRES	Nombre de cas
C 1	1
C 4	1
C 5	3
C 6	2
C 7	1

VERTEBRES	Nombre de cas	VERTEBRES	Nombre de cas
D 3	4	L 1	46
D 4	6	L 2	11
D 5	13	L 3	4
D 6	9	L 4	5
D 7	11	L 5	1
D 8	17		
D 9	10	SACRUM	1
D 10	11		
D 11	16	INCONNUE	8
D 12	36		

La répartition de l'énergie a été encaissée par plusieurs fractures qui présentent des lésions moins importantes que s'il n'y avait qu'une vertèbre fracturée. La répartition des fractures multiples montre qu'il existe une infinie variété de combinaisons. Il est difficile d'affirmer la présence de combinaisons privilégiées liées à l'anatomophysiologie du rachis. Nous pouvons retenir l'association fréquente :

- des atteintes dorsales multiples,
- des fractures de la région comprise entre D 11 et L2 qui peuvent être isolées ou associées à d'autres localisations.

Il faut également retenir la possibilité d'apparition de localisations différentes de fractures du rachis avec le même type de siège, selon l'avion utilisé et l'emploi opérationnel.

Les lésions autres que les fractures du rachis intéressent surtout les membres inférieurs : fractures du fémur, du tibia, du péroné (1/3 inférieur), de l'astragale, luxations de la hanche, du genou. Les fractures du sternum, des côtes, du crâne (voute, face), rarement isolées, s'observent dans les atterrissages difficiles. La perte du casque constitue toujours un facteur défavorable (67).

5.3.3.7. Mécanisme physiopathogénique des fractures du rachis au cours de l'éjection (7)(9)(49)(52)(70)(73)(74)

Les fractures du rachis surviennent essentiellement aux deux phases critiques de l'éjection :

- départ du siège,
- atterrissage.

La phase séparation siège-pilote et l'ouverture du parachute sont susceptibles d'engendrer des lésions en cas d'incident de fonctionnement.

1. Mécanisme d'apparition des lésions au départ du siège :

Tous les sièges éjectables actuels créent au départ une accélération compatible avec les résistances des structures de la vertèbre : accélération d'amplitude inférieure à 20 G pendant 0,2 à 0,5 seconde avec un jolt pratiquement inférieur aux normes admises (200 g/seconde).

Un modèle biomécanique a un degré de liberté est utilisé par l'U.S.A.F. (Spécification USAF-MIL A 9479) pour connaître les accélérations qu'une colonne vertébrale peut subir. L'index de réponse (D.R.I. : dynamic response index) de ce modèle est limité à 18 dans les conditions standards, ce qui correspond à une probabilité de lésions vertébrales de 0,05. Malheureusement, ce modèle ne tient pas compte des mauvaises positions du pilote et par là des modifications difficiles à quantifier dans la répartition des accélérations qu'elles soient simples ou de type complexe (longitudinales, angulaires et circulaires) qui agissent sur le rachis. Ce D.R.I. d'ailleurs applicable que pour le seul axe Gz ($\pm 15^\circ$) ne nous paraît pas présenter un intérêt très pratique et nous ne le considérons comme peu crédible pour l'homme. Par contre, pour étudier un siège dans un seul axe, ce procédé garde un intérêt.

Le facteur le plus important est la position du pilote au moment de l'éjection (9)(13)(165)(197)(244).

Rôle de la position du pilote

Nous estimons avec ROTONDO (197) et de très nombreux auteurs, que la position du corps représente le facteur pathogénique le plus important dans le mécanisme d'apparition des fractures du rachis. Dans l'enquête médicale après éjection il importera de faire préciser au pilote sa position exacte au moment du déclenchement de l'éjection.

Toute position anormale entraîne une fragilité de la colonne vertébrale et peut engendrer des lésions, même pour des accélérations par ailleurs tolérables.

Les facteurs modifiant la position du pilote sont très nombreux.

L'attitude de l'avion au moment de l'éjection a son importance. Elle modifie les rapports siège-pilote. Ainsi, dans les éjections tête en bas, le bassin est obligatoirement décollé du siège, même si le sanglage est parfaitement effectué. De même, au cours des éjections avec un avion incliné sur la tranche, il existe une flexion latérale du tronc qui est d'autant plus importante que le harnais est mal adapté.

Le sanglage très lâche du harnais autorise une liberté trop importante du tronc qui se fléchit considérablement pendant l'éjection ; le risque devient majeur pour le rachis.

A contrario, un sanglage trop serré explique parfois l'apparition de douleurs aiguës siégeant dans la région interscapulaire et les localisations hautes des fractures de la région dorsale.

La flexion du tronc en avant sur le siège Martin-Baker A M 4 est limitée par le rideau et par les sangles. Pour le système de commande basse, ROTONDO explique que la flexion est plus marquée pour les sujets longilignes avec long thorax et bras plus courts. Dans ces conditions, il est possible que le pilote ne peut complètement et correctement appliquer le rachis contre le dossier du siège dans le très court temps se passant entre le déclenchement de l'éjection et l'éjection proprement dite.

L'utilisation de la commande basse provoque plus de fractures du rachis que l'emploi du rideau E.V. Rice et E.H. Ninnow (Rapport du groupe " Spinal Injury") (9). Mais ces faits ne semblent pas admis par certains auteurs.

Les fractures surviennent dans les courbures du rachis :

- à la charnière dorsolombaire
- au milieu de la zone D6, D7, D8 le plus souvent.

Les vertèbres placées au milieu des courbures sont les points de faiblesse du rachis.

Par contre, quand le pilote est bien assis (attitude correcte correspondant aux consignes apprises lors des séances d'endocinement), les courbures physiologiques sont réduites. En effet, dans la position normale assise, la colonne lombaire réduit sa lordose lombaire et sa cyphose dorsale. La colonne a donc tendance à s'aligner et cette position est optimale dans la tolérance aux éjections.

Les études radiographiques sur siège éjectable confirment l'influence de certains facteurs sur la flexion rachidienne dorsale (23) (52) (53) (64).

Le réglage du siège est fondamental. La position " baquet bas " a tendance à rétablir l'ensellure lombaire et à accentuer la cyphose dorsale. Si, dans ce cas, les jambes sont ramenées contre le siège éjectable, la lordose lombaire se corrige mais la cyphose dorsale reste inchangée. Il existe alors une angulation dans la zone D4 D5 D6. Par contre, en position normale du siège, le repli des jambes ne modifie pas la courbure du rachis.

La hauteur du baquet s'ajuste selon l'anthropométrie du sujet. Elle doit être en relation avec la hauteur de la verrière (G.A.F.) et être suffisante pour que les cuisses restent collées au baquet et que l'angle entre tronc et cuisses soit de 135°.

Il n'existe pas de relations valables du point de vue statistique entre anthropométrie, poids et lésions vertébrales du rachis (Kaplan) (142)

L'influence des mensurations des pilotes sur la flexion vertébrale à l'éjection a été particulièrement étudiée par l' U.S. Army. Kaplan , par une étude radiologique trouve qu'à l'éjection sur siège M K 5 :

- les sujets à petit buste (5ème percentile, hauteur assis) augmentent la flexion et les risques de fractures au niveau de L1.
- les sujets à grand buste (95ème percentile, hauteur assis) augmentent le risque vertébral à D8.

L' U.S. Army recommande de limiter la hauteur du sujet assis aux percentiles compris entre 40 et 70. Cependant, les statistiques de l' U.S. Navy et l' U.S. Army, avec le même siège M K 5, montrent une répartition très différente des vertèbres fracturées (fig 72). De même, la répartition au niveau des fractures vertébrales entre les statistiques R.A.F. et F.A.F. - Groupe SPINAL INJURY - (9) pour le même siège MARTIN BAKER M K 4, semblent prouver que les critères anthropométriques de 2 populations aux mensurations relativement semblables, ne peuvent expliquer à eux seuls la localisation de la fracture. Doivent vraisemblablement intervenir la position plus ou moins déficiente et la qualité du sanglage. MOHR (172) trouve " qu'il n'y a pas de relation significative entre les mensurations anthropométriques et l'alignement vertébral pour le siège éjectable RF/ F 4 C".

La tension trop forte du harnais , surtout si les points d'ancrage des sangles sont bas situés, peut accroître la courbure dorsale selon l'anthropométrie des sujets. Un sanglage précipité, effectué juste avant l'éjection accentue parfois la flexion de la colonne dorsale et être la cause de fractures par tassement (AUFFRET, SERIS et R.P. DELAHAYE) (1963) (53). Différents sièges éjectables sont munis d'un système de retenue automatique dont la tension s'exerce au moment de l'éjection (power retraction unit). L'intérêt de tels systèmes est statistiquement significatif sur des sièges M K 7. Il diminue les risques de fracture (G.A.F.). Sur les sièges M K 5 (U.S.Army) les avantages de ce système semblent évidents.

La position de la tête joue un rôle important. La tête tend à se fléchir en avant, car les muscles du cou en toutes circonstances, ne peuvent la maintenir droite, même avec une commande haute du type rideau. Cette flexion forcée accentue la course de flexion du rachis. En rapport avec l'habitus du sujet (taille, hauteur du tronc, rapport tronc cuisses) la flexion se produit :

- au niveau de la charnière dorso-lombaire D 11, D 12, L 1, chez les brévilignes, les méolignes.

- au niveau de D6, D7, D8, chez les longilignes (où elle peut s'associer à la précédente).

L'élimination de la flexion du tronc au moment de l'éjection est la seule voie pour éliminer la possibilité de survenue des fractures du rachis (U.S. Army). Il semble que dans la plupart des éjections actuellement observées, ce souhait reste très difficile à réaliser.

Cette flexion s'accompagne parfois d'une rotation de la tête. Ces deux mouvements créent des accélérations complexes au niveau du rachis dorsal. Le port d'un casque trop lourd, mal adapté ou de section trop grande risque, au moment où la tête du pilote est soumise au vent relatif, de favoriser la rotation de la colonne dorsale haute. Un mécanisme identique est rencontré dans les éjections en vrille, ce qui justifie pleinement, pour des utilisations particulières (essai de vrille) les systèmes de retenue de la tête.

Tout déplacement du centre de gravité de la tête ou augmentation trop importante du poids amplifie les mouvements de flexion en avant de la tête et du dos, et augmente les risques d'apparition de fractures vertébrales.

L'angle inclus est l'angle existant entre l'axe du rachis et celui de la poussée (fig 73 et 74). Il mérite une attention très particulière.

Les valeurs élevées favorisent l'apparition des fractures de la colonne vertébrale par le mécanisme de l'hyperflexion. Même en position d'éjection correcte, la colonne n'est pas alignée avec l'axe de poussée. L'angle inclus, quand il a des valeurs élevées, a les mêmes conséquences qu'une flexion accentuée du tronc.

Les modifications importantes de la statique vertébrale, notamment de la cyphose dorsale, doivent faire l'objet de décisions d'inaptitude. Des radiographies de cyphotiques effectuées sur des sièges éjectables, montrent que la courbure rachidienne sagittale se modifie peu lors de la position assise, malgré le respect des procédures d'éjection. La présence fréquente de scoliose dorsales chez de jeunes adultes candidats à un emploi du personnel navigant nous fait discuter, pour l'avenir, de l'influence de ce trouble statique sur le risque vertébral (52) (53) de l'éjection. En 1980, il est encore trop tôt pour préciser, dans certaines éjections très complexes, l'importance statistique relative de ces anomalies de la statique vertébrale (scoliose, accentuation de la cyphose dorsale physiologique, association de ces deux troubles).

2. Ejections en configurations anormales :

Dans de nombreuses configurations (vol sur le dos, sur la tranche, vrilles), le dos surtout si le sanglage n'est pas correctement appliqué, ne repose pas contre le dossier. La masse du pilote de plus, n'est pas en contact intime avec le coussin du siège. La dynamique de l'éjection est profondément modifiée et l'emplitude (facteur G) dépasse souvent les tolérances admises (25 G) par la plupart des armées de l' Air. Les enquêtes médicales tendront à préciser la position exacte du pilote mais ne pourront pas affirmer la nature des différentes variétés d'accéléérations et leur importance. L'expérience, malheureusement, démontre que ces éjections en configurations anormales créent proportionnellement plus de lésions vertébrales que celles où l'avion est en vol normal. La figure 78 résume les différentes causes de lésions vertébrales dues au pilote et au siège survenant après le départ du siège.

3. Transmission des accélérations à l'ensemble siège-pilote. Importance du coussin.

- Observation (52)

L'exemple suivant, très évocateur, démontre l'importance que prend un simple coussin.

Lors d'un survol de région maritime, un pilote se voit dans l'obligation d'abandonner son appareil en panne. Pour ce genre de mission, le paquetage rigide du siège est remplacé par un ensemble plus souple, comportant sur le dessus un dinghy plié. De plus, pour des raisons de confort personnel, le pilote avait rajouté un épais coussin de mousse synthétique. L'abandon se réalise dans des conditions idéales : le pilote se met en vol horizontal, à une altitude de 2.000 mètres et réduit sa vitesse à 200 kts ; il tend son harnais, contrôle minutieusement sa position et prend même le temps de consulter son manuel d'éjection ! Au moment de l'éjection, il ressent un choc très sec et , peu après, il prend conscience d'une violente douleur dorsale. L'arrivée au sol est également exceptionnelle ; il n'y a pas de contact direct avec le sol ; le parachute reste accroché aux branches d'un arbre. L'examen radiographique objective une fracture de la huitième vertèbre dorsale. La réception au sol, dans ce cas particulier, n'a joué aucun rôle. Les conditions idéales de l'éjection ne devaient pas entraîner de lésions. La fracture vertébrale revient au coussin modifié : son utilisation a

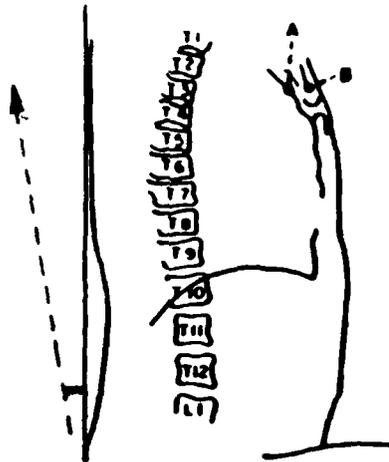


Figure 73 : Schéma dessiné à partir de radiographies de tronc de cadavres sectionnés d'après LATHAM (1957) in Gillies (106)

- A. Centre de gravité du corps au-dessus de D12 en actionnant le rideau (commande haute)
- B. Centre de gravité du corps au-dessus de D12 en actionnant la commande basse.

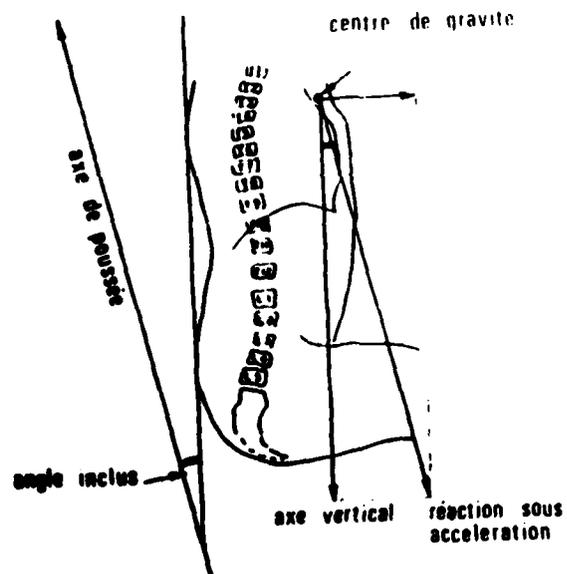


Figure 74 : Angle inclus entre axe de poussée et axe du rachis d'après Gillies (106)

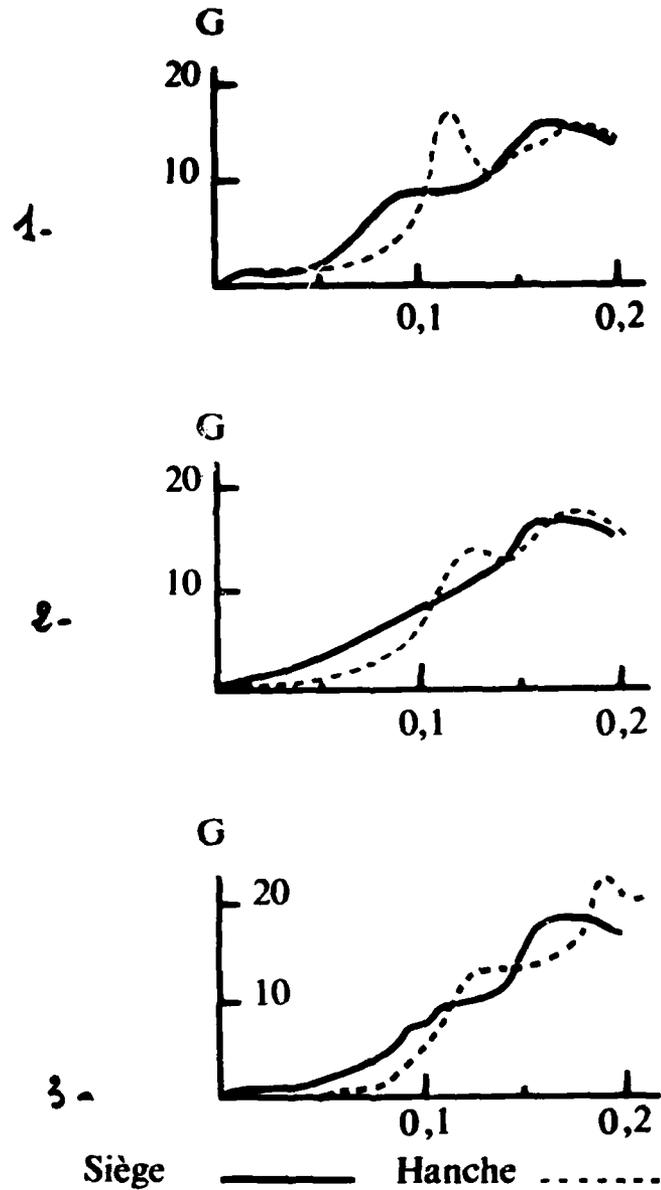


Figure 75 : Profils d'accélération avec plusieurs types de coussin,
d'après LATHAM (157)

1. Parachute, canot pneumatique et coussin hydraulique.

2. Parachute et coussin de feutre mince.

3. Parachute et coussin de feutre épais.

————— : Accélération siège.

- - - - - : Accélération hanche du sujet.

faussé la transmission des accélérations au pilote ; ces accélérations, habituellement inférieures aux limites de la tolérance humaine, ont dépassé les seuils de résistance.

- Etude expérimentale -

Les résultats expérimentaux confirment ces faits. A la suite de LATHAM (157) plusieurs auteurs ont procédé à des enregistrements d'accélérations au cours de plusieurs séries d'expériences avec mannequins. Des accéléromètres sont fixés aux sièges et à différents niveaux sur les mannequins anthropomorphiques (hanches, épaules, tête). Plusieurs types de coussin sont comparés.

Le dépouillement des résultats met en évidence que :

- la différence entre les profils d'accélération du siège et du bassin du mannequin est variable en fonction du coussin utilisé ;
- les coussins les plus durs donnent les meilleurs résultats, les deux courbes d'enregistrement du siège et du bassin sont alors presque superposables ;
- d'une manière générale, les accélérations au niveau de la hanche sont plus élevées que celles du siège ;
- pour une même expérience, les accélérations sont d'autant plus élevées qu'on se rapproche de la tête. (figure 75)

Théorie mécanique de l'ensemble siège-pilote (70)(73)

L'équivalent mécanique simplifié de l'ensemble éjecté peut être représenté par deux masses distinctes reliées entre elles par un système ressort-amortisseur correspondant à l'élasticité et à l'amortissement du coussin (fig 169)

Si le ressort est très rigide (ou l'amortissement infini) les accélérations enregistrées au niveau du pilote et du siège sont identiques. Tout mouvement du siège entraîne un mouvement identique du mannequin anthropomorphe.

Si le ressort est peu rigide, il commence par être comprimé et l'accélération se transmet au pilote avec déphasage. Ce retard correspond au déplacement relatif du siège par rapport au sujet. Le mouvement n'est transmis que si le ressort est comprimé au delà de sa position d'équilibre. L'énergie emmagasinée par le ressort au cours de la première phase s'ajoute à celle de la cartouche pyrotechnique. Sur l'enregistrement, on observe un pic transitoire d'accélération au niveau du mannequin. Cette accélération plus élevée est atteinte dans un temps plus court : le taux d'accroissement de l'accélération (JOLT) se trouve majoré.

En réalité, ce schéma très séduisant est trop simple. La colonne vertébrale, elle même modifiée par sa dynamique, la transmission des accélérations.

Le schéma de DIECKMAN (1957) (79) repris par R.R. COERMAN (1962)(39) et ses collaborateurs explique la relation entre l'excitation initiale (accélération du siège) et ses modifications à travers le corps humain (fig. 168). COERMAN considère que le corps humain peut être considéré comme formé d'un ensemble de masses suspendues. Des systèmes de ressort et d'amortisseurs (ligaments, muscles, disques intervertébraux) relient entre elles les masses corporelles principales (tête, thorax et bras, bassin et jambes).

La notion de fréquence de résonance est capitale. Elle domine les effets physiologiques des vibrations et des accélérations sur le corps humain. Ces effets dépendent de la fréquence imposée et de la fréquence propre de chaque segment corporel. Il y a résonance, c'est à dire de grandes amplitudes de déplacement lorsque la fréquence des oscillations forcées est égale à la fréquence propre du système (chapitre 6-1).

La fréquence de résonance principale de la colonne vertébrale, du bassin et des jambes est de 5 Hz et il faut donc la filtrer au maximum. Or, les coussins élastiques possèdent la caractéristique d'amplifier la fréquence 5 Hz (période 0,20 seconde) durée de la phase propulsée de beaucoup de sièges.

Les coussins de siège doivent être très rigides et le confort est amélioré par l'augmentation de la surface d'appui (mise en forme de la surface de contact). L'utilisation des coussins souples reste possible à la condition expresse qu'ils soient seulement comprimés par le seul poids du pilote. Il ressort de ces études que seuls les coussins homologués ne modifiant pas le système oscillatoire siège-pilote doivent être employés sur les sièges.

Actuellement, ces problèmes de coussins semblent bien maîtrisés ; En effet, les paquetages de survie-sauvetage sont incorporés dans des enveloppes très rigides, parfois en matériau plastique. Il apparaît que les limites définies pour les accélérations Gz (20 G pendant une durée de 0,10 seconde - JOLT 200 G (seconde) représentent des valeurs maximales au niveau du pilote et non au siège.

4. Ejection à travers la verrière :

Dans le but d'évacuer soit un aéronef à vitesse d'enfoncement importante (avion à décollage vertical) soit sur l'eau (avion de combat de l'aéronavale), il a été préconisé de passer directement à travers la verrière.

Deux modes sont alors possibles.

- passage à travers la verrière intacte,
- passage à travers la verrière préalablement fragilisée par un système de découpe pyrotechnique.

Ejections à travers la verrière intacte :

D'une étude expérimentale conduite au Centre d'Essais en Vol de BRETIGNY par H. SERIS et R. AUFFRET (5) (206), de 1962 à 1964, sur des mannequins anthropomorphiques et des cadavres équipés d'accéléromètres, de jauges de contrainte et de capteurs d'effort, il a été possible de tirer un certain nombre de données fondamentales.

A l'éjection normale, s'ajoutent trois risques nouveaux :

- une modification du profil d'accélération du siège et du mannequin provoquant vraisemblablement des accélérations plus élevées au niveau du siège et des masses corporelles représentées par le bassin, le thorax, et la tête. Il en résulte une compression plus importante des vertèbres.

- un impact contre la verrière au niveau de la tête, des épaules et des genoux.

- des déchirures des vêtements de protection et des détériorations des équipements de sauvetage (gilets, gants, combinaison anti-immersion, chenille-masque). Il est possible de noter l'existence de lésions cutanées plus ou moins profondes provoquées par des fragments de plexiglass qui ont lacéré les différentes épaisseurs de vêtements.

A l'aide de la description expérimentale d'une éjection à travers verrière réalisée au Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vol de BRETIGNY, nous pouvons étudier le phénomène (fig. 76).

Au début, l'accélération du siège est plus ou moins forte. Puis, elle décroît rapidement (négligence de l'accélération) un des breakers rentre au contact de la verrière et freine le mouvement du siège). Pendant ce temps, l'accélération mesurée au bassin, croît régulièrement puis change de signe. Le mannequin continue sur sa lancée alors que le siège est freiné. Tout se passe comme si le mannequin était désolidarisé du siège.

Au moment de l'éclatement de la verrière, le siège accélère à nouveau d'abord lentement par la destruction de la verrière, puis rapidement pendant une phase très courte lorsqu'il n'y a plus d'obstacle. Enfin, le siège rattrape le mannequin produisant :

- une décélération du siège,
- une mise en accélération du mannequin.

Puis les courbes d'accélération du siège et du mannequin suivent des évolutions pratiquement parallèles. Les trois courbes siège, bassin, tête, présentent des oscillations traduisant des échanges d'énergie entre le siège, le coussin et les différents éléments de la structure du mannequin.

Interprétation physiopathogénique (fig 76)

Le pilote est soumis à des accélérations plus élevées que lors d'une éjection normale.

Au moment où le brise verrière atteint la verrière, la vitesse du siège est faible. La poussée qui fait céder la verrière demande une pression relativement élevée dans le tube du canon. Au cours du dégagement, cette pression créera une impulsion plus forte au siège qui se traduira par une pointe d'accélération plus ou moins importante. De plus, pendant l'arrêt du siège, le pilote continue sur sa lancée et décolle légèrement du coussin. Il est ensuite rattrapé et projeté vers le haut.

Les enregistrements indiquent que la secousse atteint 1000 G/seconde mais sa durée est de quelques millièmes de seconde. Les accélérations se transmettent du bassin à la tête en 0,03 seconde. Si la durée de la pointe est inférieure à cette valeur lorsque la tête subit l'accélération, la compression vertébrale est plus faible.

De ce fait, un pic de 40 G au niveau du siège ne produit que 21 G au bassin, 38 G à la tête et une compression vertébrale modérée : 225 décaNewtons. Inversement pour des durées supérieures, tous les systèmes amortisseurs viennent en butée et les vertèbres subissent une compression $F = m \cdot \gamma$.

Les pointes d'accélération sont d'autant plus importantes que le délai de destruction de la verrière est plus long. L'épaisseur de la verrière doit être inférieure à 9 mm.

Ejection à travers verrière fragilisée :

Ce mode d'évacuation semble le plus favorable, le gain de la seconde étant conservé. La tête de siège arrive sur une verrière n'offrant aucune résistance ainsi, le profil de l'accélération communiquée par les cartouches pyrotechniques n'est pas modifié. Il n'y a pas d'impact véritable du crâne et des genoux. Ce moyen s'est d'ailleurs révélé très efficace dans le cas de verrière peu inclinée type F 1.

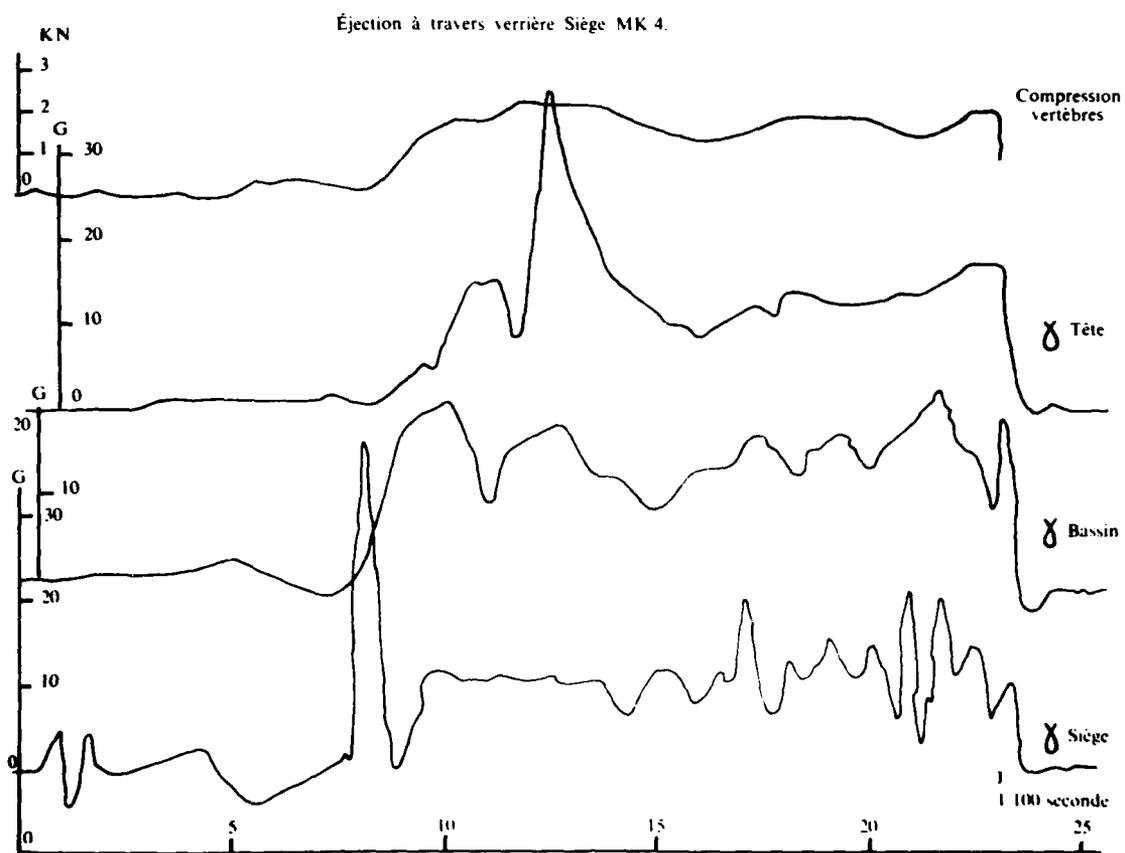


Figure 76 : Ejection à travers verrière Siège MK 4.
 (Centre d'Essais en Vol de Brétigny-sur-Orge)

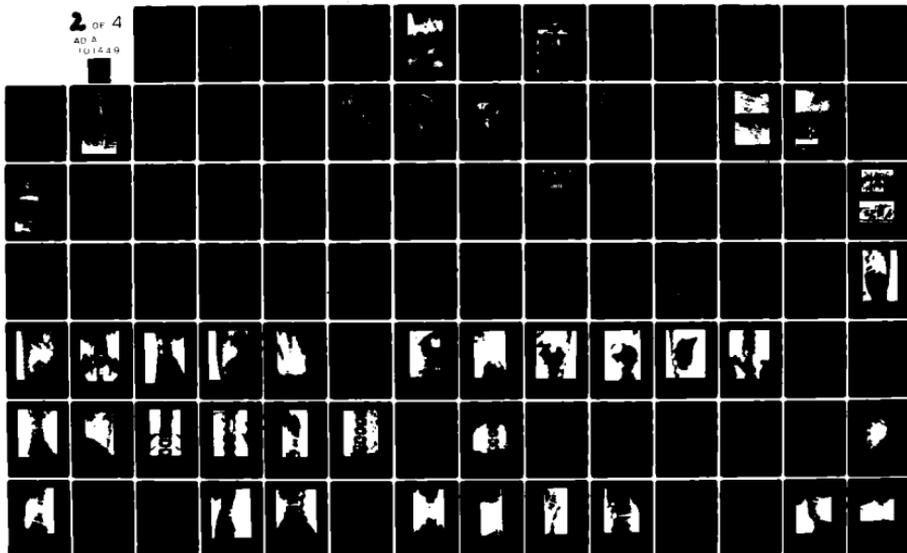
AD-A101 449

ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT--ETC F/8 6/5
PHYSIOPATHOLOGIE ET PATHOLOGIE DES AFFECTIONS DU RACHIS EN MEDE--ETC(U)
APR 81 R DELAHAYE, R AUFFRET, P DOURY

UNCLASSIFIED

NL

2 OF 4
AD A
101449



Néanmoins, il faut insister sur un point fondamental. La fragilisation ne peut être véritablement efficace que si l'ensemble siège-pilote ne rencontre pas un environnement de morceaux de plexiglass. En effet, si les accélérations trop importantes, les impacts traumatisants pour les genoux et la tête sont supprimés, il persiste des risques de détérioration des équipements et des vêtements de protection. De plus, le danger d'impact de morceaux de plexiglass, plus ou moins volumineux pris dans le vent relatif, reste difficile à préciser.

Environ, 500 éjections à travers verrière ont été enregistrés dans le monde. Le pourcentage des lésions observées chez les pilotes, plus particulièrement des fractures du rachis, est à peine plus élevé que pour les éjections classiques.

5.3.3.8. Choc à l'ouverture du parachute (fig 77)

Le temps de déploiement d'un parachute est fonction du remplissage de sa coupole. La distance nécessaire à l'ouverture complète est variable selon la taille du parachute mais indépendante de la vitesse de déplacement.

Expérimentalement, on a déterminé qu'un parachute doit parcourir 6 à 8 fois son diamètre avant d'être gonflé. Le temps du remplissage à l'inverse est lié à la vitesse de chute. A des vitesses plus grandes correspondent des temps de remplissage plus courts.

Les vitesses de chute en altitude sont nettement plus élevées que près du sol. A 20.000 mètres, elle atteint 200 mètres par seconde (400 Kts) tandis que près du sol, elle oscille entre 45 et 50 mètres par seconde (100 Kts) (fig 69).

A haute altitude, compte tenu de la vitesse élevée de chute, la décélération est très importante et rapide. Le choc d'ouverture du parachute est très brutal. La décélération atteint parfois 30 à 40 G. Elle entraîne des dégâts très importants au parachute du pilote et crée des lésions de la colonne cervicale, soit de la charnière occipito-atloïdienne (cas de K.E. PLETCHER, J.E. NEELY 1960) (183) soit des fractures luxations de C5, C6.

Actuellement, ces lésions traumatiques n'existent qu'en cas de défaillance des mécanismes destinés à interdire l'ouverture du parachute à des altitudes trop élevées ou des vitesses trop grandes. Elles restent exceptionnelles.

5.3.3.9. Atterrissage

Bien qu'il existe des différences notables entre parachutage du pilote éjecté et celui d'un militaire des troupes aéroportées, la pathologie observée s'apparente à la traumatologie du parachutiste. De nombreux auteurs après R.H. SHANNON (215) évaluent à 30-40% le pourcentage des lésions attribuables à l'atterrissage. Dans les enquêtes médicales après éjection, il est d'ailleurs souvent difficile de préciser le moment d'apparition (départ du siège, arrivée au sol) de la fracture du rachis.

A l'impact au sol, le mécanisme est double : pression verticale de bas en haut sur une colonne dorso-lombaire en hyperflexion. Les fractures observées sont de type variable avec ou sans atteinte discoligamentaire (voir chapitre 5.3.4. parachutisme) La localisation préférentielle de ces fractures au segment D12-L3, avec une nette prédominance à L1, est identique à celle rencontrée dans les autres traumatismes du rachis (médecine aéronautique, médecine sportive, accidents de la circulation).

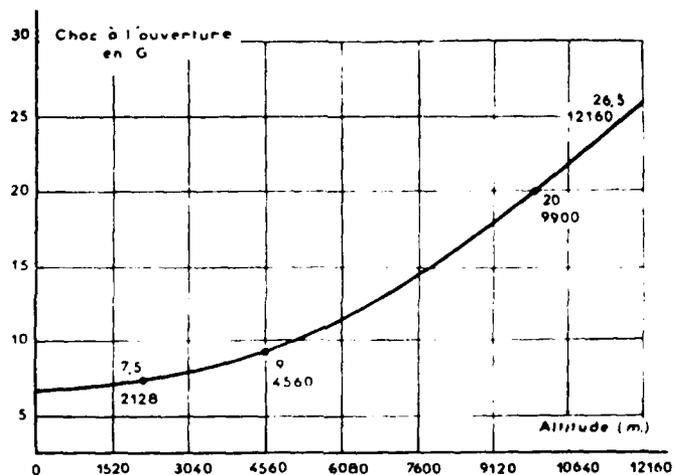


Figure 77 : Importance du choc à l'ouverture en fonction de l'altitude (voilure de 28 pieds)

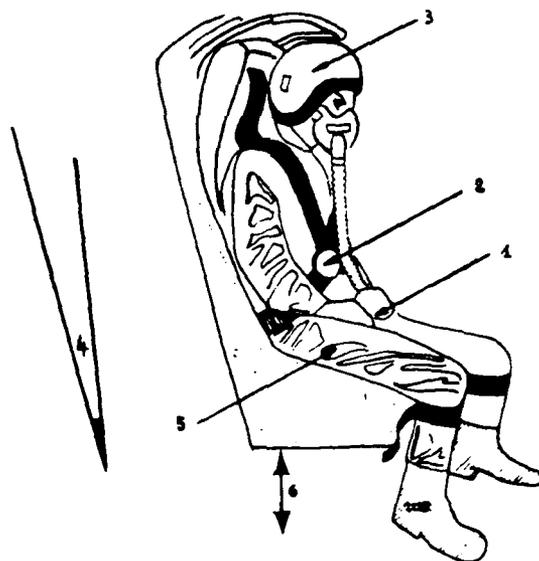


Figure 78 : Schéma indiquant les différentes causes de lésions dues au pilote ou au siège apparaissant au départ du siège

- 1) Commande basse (avec insuffisance de sanglage)
 - 2) Insuffisance de sanglage
 - 3) Casque trop grand
 - 4) Angle incliné
 - 5) Position assise (plus ou moins enfoncée dans le siège et symétrique)
 - 6) Hauteur du baquet (ne figure pas le nombre de G)
- d'après R.P. DELARAYE et Coll.

5.3.4. LE PARACHUTISME

A. LEGER, R.P. DELAHAYE

SOMMAIRE PARTICULIER

INTRODUCTION et GENERALITES

5.3.4.1. PHYSIOPATHOLOGIE ET ETIOPATHOLOGIE DU SAUT EN PARACHUTE.

5.3.4.1.1. De l'abandon de l'appareil à l'ouverture du parachute.

1. La sortie et ses incidents
2. La chute libre

5.3.4.1.2. L'ouverture du parachute.

1. Aspects théoriques
2. Données pratiques et incidences physiopathologiques.

5.3.4.1.3. La descente parachute ouvert

5.3.4.1.4. L'atterrissage

1. Dynamique
2. Technique d'atterrissage

5.3.4.2. PARACHUTISME - MOYEN DE TRANSPORT -

5.3.4.2.1. Matériels utilisés par le parachutisme militaire

1. Parachutes
2. Tenues de saut

5.3.4.2.2. Techniques et entraînement des parachutismes militaires

5.3.4.2.3. Fractures ettraumatismes du rachis

1. Fréquence et répartition des fractures
2. Mécanisme pathogénique
 - . Choc à l'ouverture
 - . Choc à l'atterrissage

5.3.4.2.4. Les autres lésions

5.3.4.2.5. Les séquelles traumatiques du parachutiste.

5.3.4.3. LE PARACHUTISME SPORTIF

5.3.4.3.1. Conditions générales de la pratique sportive

1. Différences avec le parachutisme militaire
2. Les pratiquants

5.3.4.3.2. Matériels utilisés par le parachutisme sportif

1. Parachutes hémisphériques et dérivés
2. Voilures à tuyères
3. Voilures planantes

5.3.4.3.3. Traumatologie rachidienne en milieu sportif

1. Recueil des informations
2. Résultats

5.3.4.3.4. Le vol relatif

5.3.4.3.5. La précision d'atterrissage

5.3.4.4. LE VOL LIBRE

5.3.4.5. LIMITES HUMAINES DE TOLERANCE AUX IMPACTS EN CHUTE LIBRE

(voir sommaire particulier)

INTRODUCTION et GENERALITES

Employé primitivement comme moyen de sauvetage des aviateurs et des aérostatiers, le parachute allait permettre dès 1935 l'élaboration de nouvelles tactiques d'infiltration sur les arrières de l'ennemi. Dans le dernier conflit 1939.1945, les troupes parachutistes furent employés en action commando au cours de grandes opérations : Wehrmacht en 1940 (Pays-Bas - Belgique), 1941 (Crète), 1942 (Russie), Troupes Anglo-Américaines (Normandie, Arnhem). A l'issue du conflit de grands progrès auront été réalisés tant dans les doctrines d'utilisation que dans les techniques d'entraînement préfigurant l'essor moderne des troupes aéroportées. Ces dernières seront fréquemment employées, en particulier par la France, au cours des campagnes d'Indochine et d'Algérie, et par les Américains en Corée.

La nécessité de réduire au minimum les risques de traumatismes immobilisateurs a entraîné une évolution des techniques d'atterrissage.

Le parachutisme sportif s'est développé en France et dans le monde après la deuxième Guerre Mondiale. Dans un premier temps, cette pratique sportive est très proche du parachutisme militaire tant par les matériels employés que par les techniques de saut enseignées. Les années de 1960 à 1980 ont enregistré une fantastique évolution du parachutisme sportif qui possède maintenant ses méthodes d'entraînement ses compétitions et qui utilise un matériel très spécial (parachute à fente, voile planeur). Aux techniques de base : atterrissage de précision et voltige acrobatique est venu se joindre le vol relatif qui permet le regroupement, en chute libre, de plusieurs parachutistes qui forment des figures. Des championnats du monde sont d'ailleurs régulièrement organisés dans ces trois disciplines.

Le vol libre ressemble plus à un vol de planeur mais les conditions d'atterrissage rappellent celles d'un parachutiste. Bien qu'il n'y ait actuellement que peu d'applications militaires opérationnelles, nous avons tenu à décrire cette nouvelle variété de vol où les lésions traumatiques particulièrement fréquentes sont souvent très graves.

La chute libre commune à toutes les variétés de parachutismes permet l'étude des impacts et ce chapitre de biodynamique nous a paru intéressant à traiter.

5.3.4.1. PHYSIOPATHOLOGIE ET ETIOLOGIE DU SAUT EN PARACHUTE.

Chuteur confirmé, sportif débutant, combattant, tous les parachutistes quelque soit le matériel employé, ont en commun un certain nombre de gestes et d'impératifs.

Nous distinguons 4 périodes :

- de l'abandon de l'appareil à l'ouverture du parachute,
- l'ouverture du parachute,
- la descente parachute ouvert,
- l'atterrissage.

5.3.4.1.1. De l'abandon de l'appareil à l'ouverture du parachute

5.3.4.1.1.1. La sortie (figure 79) et ses incidents.

La sortie proprement dite -

L'abandon d'un appareil en vol, d'une altitude plus ou moins élevée, apparaît généralement au commun des mortels comme un " acte contre nature ". En fait, l'effort exigé avant de se résoudre à se jeter hors de l'appareil se révèle très important pour tout parachutiste débutant.

Les incidents apparaissant à cette phase de sortie de l'avion demeurent exceptionnels. Le parachutiste heurte l'appareil ou accroche son parachute aux structures de l'avion.

Heurt de l'appareil

Deux cas d'incidents : le parachute rentre en contact avec le fuselage de l'avion. Il en résulte parfois une perte de connaissance dont les conséquences deviennent dramatiques s'il s'agit d'un parachutiste pratiquant la chute libre sans dispositif d'ouverture chrono-barométrique.

Quand le sujet se trouvant en position à la porte ou se déplaçant à l'intérieur de l'avion pour s'y rendre, le parachute ventral s'ouvre de façon intempestive. La voile soumise au vent relatif de l'avion s'ouvre immédiatement entraînant le parachutiste à l'extérieur. Le heurt contre les parois constitue une éventualité grave entraînant parfois, non seulement des blessures pour le parachutisme en cause, mais aussi des avaries de l'avion largueur.

L'accrochage du parachutiste à l'avion s'observe à la suite d'un défaut de fonctionnement du système d'ouverture automatique du parachute d'un débutant ou lors de l'ouverture prématurée d'une des deux voiles avant que le parachutiste se soit éloigné des structures arrières de l'avion.



Figure 79 : Sortie d'avion gros porteur Nord 2501 chuteur confirmé.



Figure 80 : Parachutiste en position de dérive maximale. Le corps est incliné par rapport au vent relatif, les bras sont en flèche formant un dièdre négatif. La vitesse sur trajectoire peut atteindre 220-230 km/h, (la composante horizontale peut dépasser 40 km/h).

Les problèmes de sauvetage s'avèrent très difficiles si l'on n'arrive pas à décrocher ou à remonter le parachutiste et lorsque l'avion doit se poser.

Il s'agit d'incidents très rares aussi bien en pratique militaire que civile.

5.3.4.1.1.2. La chute libre

Dans la pratique courante de la chute libre, l'incidence traumatique demeure très faible. Le risque principal est constitué par les collisions en chute libre.

Un parachutiste en position de dérive maximale a une vitesse sur trajectoire élevée avec une composante horizontale de près de 40 km/h (fig 80). Actuellement avec des motivations différentes, les techniques de parachutisme civil et celle des chuteurs opérationnels des Troupes Aéroportées amènent à faire converger en même temps et vers un même point un nombre de plus en plus grand de chuteurs (12 à 15 et même plus). Toute collision entre deux parachutistes lors de ces manoeuvres peut créer des lésions graves.

Un parachutiste en chute libre peut également en heurter un autre dont la voile est déployée. Cet incident relativement peu fréquent jusqu'à présent engendre des traumatismes parfois graves et même des accidents mortels.

5.3.4.1.2. L'ouverture du parachute (fig 81)

1. Aspects théoriques

L'ouverture du parachute constitue la deuxième étape.

. Aspects théoriques.

Deux secondes environ se déroulent pour que l'ouverture du parachute soit complète. 80 mètres à 150 mètres sont environ parcourus. La vitesse du parachutiste passe de 200 km/h à moins de 30 km/h.

On estime que les efforts à l'ouverture subis par le parachutiste à l'ouverture se situent, selon les voilures, entre 500 et 800 daN-1200 daN d'effort global; c'est actuellement le maximum toléré.

Le harnais classique comprend trois sangles de 1200 daN : la fessière et les deux cuissardes . Le sujet est presque assis sur la sangle fessière (en forme de U) qui passe de chaque côté du corps puis en avant des 2 épaules. Chacune de ces deux extrémités va être reliée aux élévateurs (2 à droite et 2 à gauche du parachute) sur lesquels se répartit uniformément le choc à l'ouverture transmis par les suspentes. D'autre part, les deux sangles cuissardes patent de la fessière au niveau de l'entre-cuisse et complètent la fermeture du harnais en avant.

Ce harnais s'inspire des impératifs, définis par J. BEYNE en 1925 :

- répartition du choc à l'ouverture sur la plus grande surface d'éléments,
- application de l'effort de sustentation aux meilleurs organes amortisseurs, donc à des segments du corps rembourrés de masses musculaires importantes,
- localisation des points de choc loin des organes délicats,
- sustentation du corps dans une position telle qu'à l'arrivée au sol une réception correcte soit possible.

Les nécessités de la compétition ont cependant conduit à modifier les harnais en les allégeant au maximum.

La position classique du corps du parachutiste militaire lors de l'ouverture s'apparente à celle du fœtus in utero :

le sujet fait le dos rond, sa tête hyperfléchiée amène le menton contre le sternum, ses membres supérieurs fléchis sont au contact du thorax, ses membres inférieurs accolés sont semi fléchis de façon que les cuisses fassent un angle obtus avec le reste du corps.

Tous ses muscles sont contractés au maximum et tout particulièrement ceux du dos, du cou, de l'abdomen.

Au contraire, le parachutiste pratiquant la chute libre adopte au moment de l'ouverture la position la plus saine possible, c'est à dire corps cambré, bras et jambes étendus en croix (fig 86).

2. Données pratiques sur l'ouverture du parachute et incidences

physiopathologiques

Les forces mises en jeu par l'ouverture du parachute sont importantes. De bonnes positions limitant le risque de traumatisme sont indispensables : position de défense



Figure 81 : Ouverture d'un parachute commandé après chute libre.
Le parachute extracteur commence à tirer la voile hors du sac qui a été ouvert
par l'action du parachutiste. On note la position stable de celui-ci face sol.



Figure 82 : Voile contact
parachute Strafo flyer.

en foetus du parachutiste militaire, position en croix stable du chuteur. Elles permettent d'éviter qu'un membre soit happé par la voile ou les suspentes qui se délovent.

Certaines voilures modernes présentent des caractéristiques d'ouvertures incompatibles avec l'emploi de charges supplémentaires comme le font les chuteurs opérationnels. Lors d'essais opérationnels de tels parachutes, des lésions du rachis cervical sont observées à l'ouverture.

5.3.4.1.3. La descente parachute ouvert

Pour le débutant, c'est un moment de calme et d'euphorie. Le risque d'accrochage de deux parachutes trop rapprochés existe et cette éventualité crée souvent des problèmes sérieux à l'atterrissage.

Les voilures planantes permettent à certains pratiquants dans des buts de démonstration, de se livrer à des exercices de "voile contact" qui en cas d'incident entraînent souvent des lésions graves (fig. 82).

La majeure partie des traumatismes s'observe à l'atterrissage.

1. Dynamique de l'atterrissage

Au moment de l'atterrissage, le parachutiste, comme tout mobile, possède une énergie qui va être absorbée dans un temps très bref ($\frac{1}{2}$ à une seconde).

La force nécessaire pour annuler cette énergie est inversement proportionnelle à la distance de freinage. L'énergie que possède le parachutiste est une énergie cinétique de la forme :

$$E = \frac{1}{2} mV^2$$

Après atterrissage, la vitesse est nulle, par conséquent l'énergie cinétique est nulle. Le travail résistant est de la forme $W = - (F \times L)$.

On peut donc en déduire :

$$- (F \times L) = \frac{1}{2} mV^2$$

d'où

$F = \frac{mV^2}{2L}$

Dans cette équation interviennent la masse du parachutiste, la vitesse sur trajectoire dont il est animé et la distance de freinage. Dans le facteur vitesse, la composante vitesse du vent joue un rôle très important. On estime par le calcul qu'un parachutiste équipé d'un parachute sans vitesse propre reçoit un choc à l'arrivée au sol, pour une vitesse verticale constante de 6 m/seconde.

- 2,25 G pour un vent au sol de vitesse 0
- 3,25 G pour un vent au sol de 5 m/seconde
- 3,5 G pour un vent au sol de 7 m/seconde
- 5,5 G pour un vent au sol de 10 m/seconde

Ce choc est représenté par un vecteur accélération coïncidant avec la trajectoire du parachutiste.

Le coefficient physiologique de sécurité établi par Blériot (1905) est de 5 fois le poids du corps du parachute. Donc le saut sera interdit lorsque la vitesse du vent au sol excédera 8 m/s.

Cette dynamique permet de comprendre l'apparition de lésions graves lors d'atterrissage par vent violent (pilotes à la phase terminale d'une éjection par exemple).

2. Les techniques d'atterrissage

jouent un rôle important dans la diminution de la fréquence des lésions apparaissant dans cette phase.

On estime qu'un individu entraîné développe uniquement avec ses jambes une force équivalente à deux fois et demi le poids de son corps. Les techniques d'atterrissage tendent à augmenter la distance du freinage et à reporter l'action des différentes forces agissant sur les différentes parties du corps.

La mise en jeu des différents groupes musculaires favorise l'amortissement des forces apparaissant à l'atterrissage. La technique "roulé-boulé" a été mise au point dans ce but. Conservation d'une bonne position d'atterrissage implique un effort de volonté important.

Pour les débutants, la tendance naturelle lorsque le sol monte est de refuser le contact :

- soit en rentrant le train (c'est à dire en ramenant les pieds sous le siège)
- soit au contraire en allant chercher le sol par une extension complète des jambes sur les cuisses.

Dans les deux cas, les membres inférieurs ne peuvent jouer le rôle d'amortisseurs. Le rachis va " encaisser " la majeure partie du choc à l'arrivée. La position du corps à l'atterrissage requiert une grande symétrie du corps par rapport au plan sagittal pour répartir uniformément le choc sur les deux membres inférieurs (fig 84).

Par ailleurs, les deux membres inférieurs doivent être semi fléchis et leurs muscles semi contractés afin de réaliser une sorte d'amortisseur à bras autour des axes représentés par les articulations :

- des chevilles,
- des jambes,
- et des genoux.

Quand à la position du reste du corps, c'est celle qu'adapte le parachutiste militaire à l'ouverture avec les muscles contractés au maximum.

Cette technique n'est pas toujours suivie scrupuleusement. Les principales fautes génératrices de traumatismes rachidiens sont :

- l'atterrissage jambes écartées (atterrissage debout des parachutistes " confirmés "). Le segment lombaire va supporter la majeure partie du choc.
- le dos raidi,
- la tête droite.

On conçoit la gravité de ces fautes dans des situations limites, chez des sujets lourds ou lors d'atterrissage par grand vent.

Une autre technique, dans le parachutisme civil est employée pour éviter les incidents. En raison de l'utilisation de parachutes manoeuvrables munis d'une vitesse propre, employés au maximum de leur performance, l'aménagement des zones d'atterrissage est indispensable. On réalise des aires présentant un coefficient d'amortissement important (gravier lavé possédant un fort coefficient de frottement).

5.3.4.2. PARACHUTISME , MOYEN DE TRANSPORT

La traumatologie du parachutisme militaire est mieux connue que dans le cadre civil. La technique stable, la concentration et le contrôle rigoureux des sauts, l'existence de documents médicaux précis et accessibles en font une base d'étude particulièrement profitable et sérieuse.

5.3.4.2.1. Matériels utilisés par le parachutisme militaire

Le but général des Forces Aéroportées est de réaliser le plus rapidement possible la mise en place d'une troupe de manoeuvre plus ou moins importante dans une zone fixée. Leur utilisation se conçoit également lors de " coup de mains " sur les arrières de l'ennemi, dans des zones difficilement accessibles ou naturellement protégées parfois en renforcement d'une unité amie plus ou moins encerclée.

Le saut en parachute ne représente qu'une fraction accessoire de la mission générale des Troupes Aéroportées, mais ses impératifs ont conditionné l'utilisation d'un matériel adapté.

Le matériel de saut se compose principalement de plusieurs éléments : les parachutes (un principal dorsal et un ventral de secours) et une tenue de saut. Ce matériel est utilisé lors de sauts d'entraînement et de brevet, ainsi qu'en opération.

1. Les parachutes

Le parachute principal (figure 83) utilise un dispositif à ouverture automatique. Le modèle actuellement en service dans les formations aéroportées est le TAP 661-12 introduit récemment en remplacement au TAP 665 dont il diffère principalement par l'absence d'armature métallique dans le sac. Cette mesure améliore considérablement le confort du parachute tout en l'allégeant. Le " grément " est relié au sac et au harnais par un système de D de connexion à axe amovible. Il est constitué par la voile et le cône de suspension.

La voile est réalisée en nylon, par la juxtaposition de 24 fuseaux divisés chacun en 5 panneaux, elle a une forme hémisphérique comportant à sa partie supérieure une ouverture appelée cheminée. Sa surface est de 60 m².

Le cône de suspension est assuré par 24 suspentes de nylon d'une résistance de 250 daN, réparties en 4 groupes de 6 reliées par 4 sangles au harnais. Ces sangles sont appelées élévateurs.

Sous une charge de 100 kg, ce parachute assure une vitesse verticale d'atterrissage de 6 m/s.

La seule possibilité de manoeuvre est réalisée à l'aide de tractions sur les élévateurs, par déformation de la voilure.

L'ouverture de ce parachute utilise le système dit "suspenste première". La voile pliée est contenue dans une enveloppe indépendante du harnais. Les suspenstes sont lovées sur ce sac à voile. Après l'évacuation de l'appareil une sangle d'ouverture automatique (S.O.A.) fixée dans l'avion au câble d'accrochage assure l'extraction de la voile dans son sac, tandis que se délovent les suspenstes.

Une fois que toutes les suspenstes sont délovées, la voile sort du sac. La rupture d'une ficelle à casser d'une résistance de 55 daN assure la liaison SOA-Sac à voile avec la cheminée du parachute, permet la libération de celui-ci. Il va alors s'épanouir complètement. La séquence totale d'ouverture dure 2 à 3 secondes.

Ce système d'ouverture a augmenté considérablement la sécurité, rejetant au second plan l'importance de la position à la sortie.

On s'efforce maintenant de développer des parachutes permettant l'orientation du parachutiste face au vent, et laissant une certaine possibilité d'évitement d'obstacles.

Le parachute ventral est muni d'un système à ouverture commandée manuellement : la connexion sur le harnais du parachute principal s'effectue au moyen de mousquetons et de sangles. La surface de la voilure toujours de forme hémisphérique est de 45 m². Le cône de suspension comprend 20 suspenstes.

2. La tenue du saut

pour le parachutiste militaire se compose d'un treillis de saut, d'un casque métallique et d'une paire de chaussures de marche à tige montante type "Rangers". L'ensemble pèse 7,5 kg. En manoeuvre ou en opération, il faut ajouter le paquetage individuel (13 kg) l'arme et les munitions.

On peut considérer qu'un sujet de 70 kg représentera avec ses divers équipements un poids de 120 kg.

La plupart des statistiques utilisées pour étudier la traumatologie de parachutiste ont été élaborées à Pau (Ecole des Troupes Aéroportées). La plupart des sauts effectués en une année sont effectués avec des équipements allégés.

Des formations spéciales pratiquant la chute libre, utilisent des parachutes spéciaux, à voilures plus élaborées.

5.3.4.2.2. Techniques et entraînement des parachutistes militaires

1. Formation et brevet de parachutisme militaire

La formation préparatoire au saut en parachute a lieu dans les unités ou les centres de préparation militaire. Elle a pour but d'amener aux différents stades de saut un personnel sélectionné, moralement et physiquement.

La préparation morale est très importante comme le montre un extrait du "règlement sur le saut en parachute", "la préparation morale des parachutistes a pour but de les amener au volontariat pour le saut".

"L'esprit de corps, une discipline particulièrement stricte, le souci de la tenue, la valeur, la compétence et l'exemple des cadres, en un mot l'ambiance générale du milieu que saura créer l'encadrement, sera un excellent moyen de développer l'esprit d'audace que tous possèdent à des degrés divers".

L'entraînement du saut proprement dit se déroule dans un "centre d'entraînement du saut". Actuellement, seule l'Ecole des Troupes Aéroportées est autorisée à dispenser cet entraînement, à l'exception de l'Ecole d'Air de Salon de Provence qui forme des élèves sous la direction d'un moniteur officier des troupes aéroportées.

Le cycle d'entraînement dure un peu plus de deux semaines à temps plein, la dernière semaine étant consacrée aux 6 sauts de brevet, dont un de nuit.

L'endoctrinement psychique, la préparation physique visent à donner aux élèves une série d'automatismes qui leur sont indispensables lors d'un saut, depuis la sortie jusqu'à la réception au sol.

Etude de l'équipement, étude^{de} la sortie de l'avion, exercices de sécurité, technique de la réception au sol : roulés-boulés de pied ferme ou à l'aide d'agrès spéciaux se succèdent pendant toute la durée de stage.

L'activité en vol, préluant à la remise des brevets s'effectue actuellement

à partir d'appareils (C 160 Transall), la capacité est de 72 à 80 parachutistes et la vitesse de largage de 130 noeuds (230 km/h). L'altitude de saut est de 400 mètres.

2. Autres aspects du parachutisme militaire

Pour les sauts automatiques, dans les différents stages de combat, on propose aux officiers et sous-officiers stagiaires des exercices de plus en plus difficiles : sauts en zone boisée, en zone accidentée, en montagne, etc ...

Ces diverses activités comportent de plus, des exercices de combat et des manoeuvres. Il existe également des stages d'initiation à la chute libre, des stages de formation des moniteurs et de chuteurs opérationnels.

5.3.4.2.3. Fractures et traumatismes du rachis

La traumatologie du rachis chez les parachutistes militaires a fait l'objet de nombreuses études (4)(23)(29)(31)(52)(65)(71)(90)(98)(99)(101)(118)(123)(148)(149)(159)(160)(190)(228)(230). C'est l'aspect de la pathologie la plus étudiée alors que les modifications cardiovasculaires l'ont peu été (110)(173).

1. Fréquence et répartition des fractures du rachis

Au cours de 1.330.000 sauts effectués à l' E.T.A.P. de Pau, il a été observé 1095 traumatismes rachidiens dont 159 fractures reconnues (52)(193)(240)(241). Le nombre de cas de fractures du rachis rapporté au nombre de sauts diminue chaque année 2,7 pour 10.000 sauts en 1959, 0,5 pour 10.000 sauts en 1966. Cette diminution notable des fractures de la colonne vertébrale est généralement attribuée à l'application stricte du règlement des T.A.P. (poids limite à 80 kg, élimination de tout sujet présentant des troubles de la statique vertébrale). L'étude analytique portant sur cette période montre 159 cas de fractures intéressant 195 vertèbres (52)(240). (Tableau 5-12)

VERTEBRES	ATTEINTES	Nombre de FRACTURES OBSERVEES
	C5	1
	C6	1
	C7	-
	D1	1
	D2	2
	D3	-
	D4	2
	D5	1
	D6	1
	D7	5
	D8	3
	D9	3
	D10	-
	D11	8
	D12	35
	L1	77
	L2	21
	L3	16
	L4	11
	L5	6
	S1	1

Tableau 5-12 : Répartition des 195 fractures du rachis ETAP.

Les fractures multiples ne sont pas rares (52)(240)

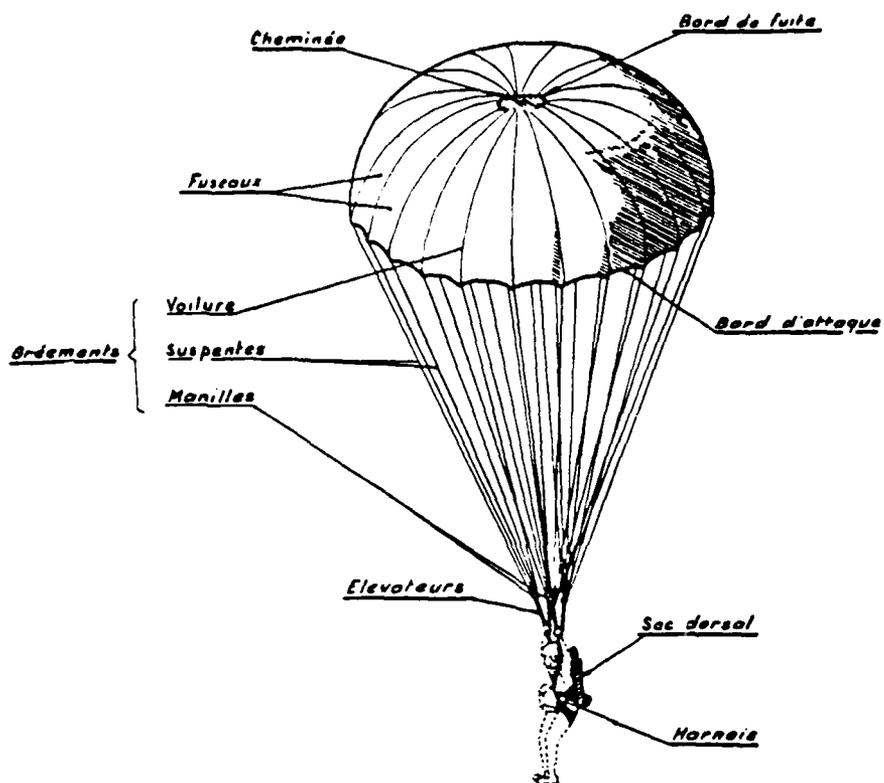


Figure 83 : Schéma d'un parachute dorsal à ouverture automatique (extrait du règlement sur le saut des troupes aéroportées françaises).

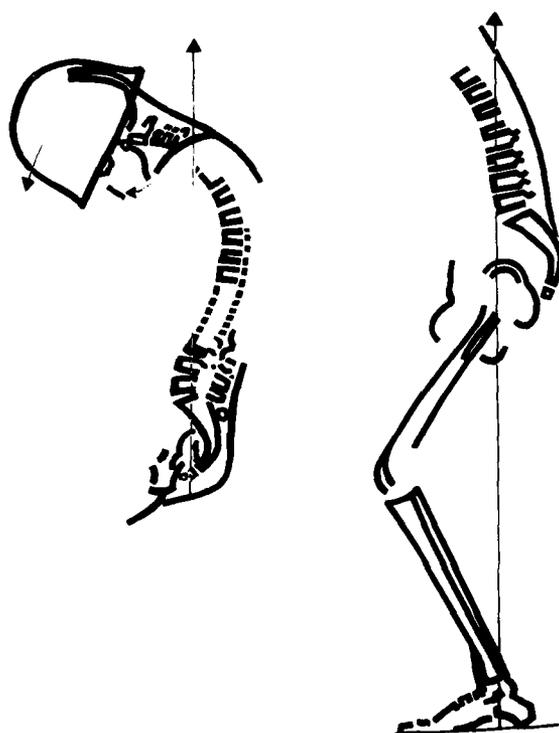


Figure 84 : Calques de radiographies de parachutistes en position :
 a) d'ouverture
 b) d'atterrissage
 avec visualisation des vecteurs.

: ASSOCIATION DE VERTEBRES FRACTUREES	: NOMBRE DE FOIS
: D1 + D12	: 1
: D6 + D7	: 1
: D8 + D9	: 2
: D11 + D12	: 1
: D12 + L1	: 7
: D11 + D12 + L1	: 3
: D11 + D12 + L1 + L2 + L3	: 1
: D11 + D12 + L1 + L2 + L3 + L4 + L5	: 2
: D12 + L1 + L2	: 1
: L1 + L2	: 1
: L1 + L4	: 1
: L1 + L2 + L3	: 3
: L5 + S1	: 1
: L3 + L4	: 4
: -----	: -----

TABLEAU 5 - 13

Dans 2 cas, 7 vertèbres ont été atteintes simultanément (atterrissage en très mauvaise condition) (tableau 5-13)

Il apparaît que le segment rachidien le plus menacé se situe entre D12 et L3, lequel a été lésé 149 fois, soit dans 76%. Les localisations plus hautes ou plus basses ne sont pas exceptionnelles. Les cervicales sont atteintes rarement. Les atteintes du mur postérieur sont rares mais toujours très graves.

2. Mécanisme pathogénique

Depuis les travaux de GREIFFER (1939) tous les auteurs s'accordent pour reconnaître que 90% des accidents dus au parachutisme surviennent à l'atterrissage

Pour préciser les courbures du rachis d'un parachutiste militaire équipé au moment de l'ouverture de la voilure et lors de l'atterrissage, J.M. TEYSSANDIER et R.P. DELAHAYE (52) (240) ont pratiqué des radiographies en position de fonction contrôlée par un moniteur des Troupes Aéroportées. L'opacité des équipements et des parachutes ne permet pas d'obtenir des clichés de face satisfaisant. Seuls les incidences de profil ont été utilisées pour faire des calques de radiographies.

- Le choc à l'ouverture de la voilure en suspentes premières pour un parachute de type T.A.P. 661 peut être représenté par un vecteur (figure 84)
 - . dirigé de bas en haut,
 - . dont l'origine se trouve sur la sangle fessière,
 - . dont la valeur est de l'ordre de 225 kg pour un sujet de 75 kg.

Ce vecteur est situé dans un plan de front qui :

- . passe par l'extrémité du coccyx,
- . prend en enfilade la charnière lombo-sacrée,
- . coupe le rachis aux environs de la charnière cervico-dorsale.

Ainsi s'expliquent certaines atteintes de la colonne cervicale, beaucoup moins fréquentes depuis que l'on a modifié le système de pliage " voilure d'abord " pour l'ouverture en " voilure première "

- Le choc à l'atterrissage peut être représenté par un vecteur (figure 84)
 - . dirigé de bas en haut,
 - . dont l'origine se trouve sur le sol,
 - . dont la valeur varie, pour un même parachutiste, avec le carré de la vitesse horizontale du vent. Ce vecteur est situé dans un plan de front qui :
 - . passe par les chevilles et les hanches,
 - . prend en enfilade les corps vertébraux de la douzième dorsale à la troisième lombaire,
 - . coupe le mur postérieur du rachis au niveau de la charnière dorso-lombaire.

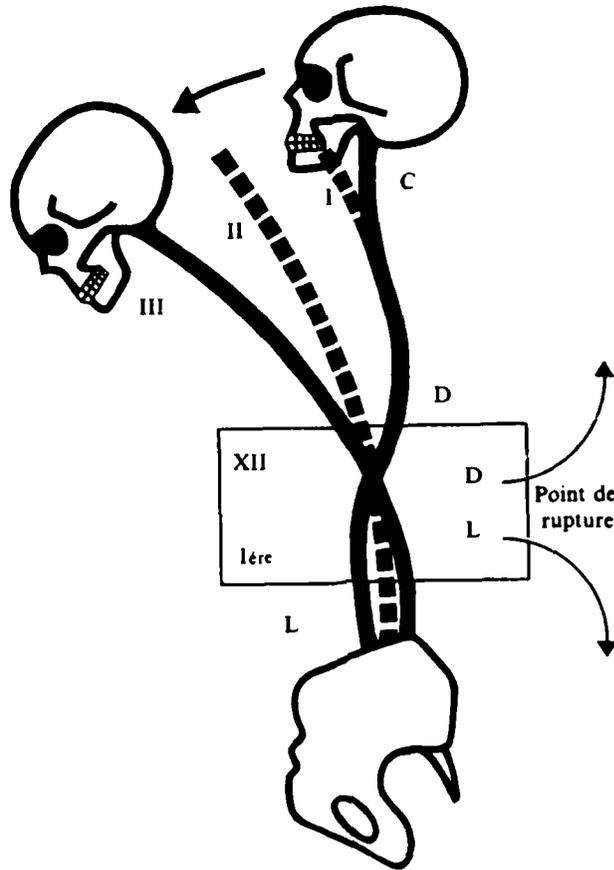


Figure 85 : Redressement de la courbure lombaire dans une flexion forcée du rachis en avant. Détermination du point de rupture ou point charnière (d'après E.FORGUE) (1903)



Figure 86 : Parachutiste en chute libre stable. On note la position en croix, bras et jambes écartées, parfaitement symétriques.

Ainsi sont vérifiées les données statistiques : le segment rachidien le plus menacé est bien situé entre D12 et L3.

Quant aux mécanismes de production des fractures du rachis, ils répondent aux règles de Watson Jones énoncées précédemment. L'association d'une hyperflexion de la colonne vertébrale à une pression vertébrale de bas en haut est le mécanisme le plus habituel. Il entraîne des fractures de type variable et des atteintes discoligamentaires qui siègent le plus souvent au niveau de D10 L2 (fig. 85).

La colonne cervicale peut être lésée par un mécanisme identique. L'axe du levier se situe aux alentours de la charnière cervico-dorsale. Des atteintes par flexion peuvent se créer :

- . à l'ouverture de la voilure si le menton n'est pas accolé au sternum (ce qui est rarissime vu l'état de contraction intense des muscles),
- . à l'ouverture chez les parachutistes chevronnés trop confiants en eux-mêmes, dans le matériel qui contractent insuffisamment leurs muscles du cou.

L'hyperextension peut créer des lésions cervicales (figure). A l'atterrissage, des projections contre des obstacles entraînent parfois des fractures des apophyses épineuses, des atteintes discoligamentaires ou des ruptures vasculaires du réseau anastomotique antérieur des artères médullaires.

Le choc direct sur le rachis est le dernier mécanisme à retenir. Si une pierre, une branche ou toute protubérance du sol se trouvent à l'endroit où le parachutiste va rouler en fin d'atterrissage, le choc direct entraîne parfois des lésions de siège variable échappant à toute systématisation. Une chute sur la tête entraîne l'apparition de lésions graves sur l'atlas, l'axis. C'est un accident rare dont une observation a été rapportée par Hahn (123). A la suite d'un mauvais atterrissage (en entraînement) en Angleterre, au cours du dernier conflit, la boîte crânienne agissant comme un marteau fait éclater l'atlas. La mort survient en un quart d'heure.

5.3.4.2.4. Les autres lésions observées à l'atterrissage

La plupart des lésions siègent au niveau des membres inférieurs (70% de la statistique de l' E.T.A.P.) (65) (242). Il s'agit le plus souvent d'entorses de la tibio-tarsienne, du genou, de l'articulation tibio-péronière supérieure, de fractures de la tibio-tarsienne (malléole interne, externe ou postérieure avec toutes les possibilités d'association), de fractures du tibia (spiroïdes), du pied (tarse et métatarse), les luxations sont plus rares. Les lésions traumatiques du membre supérieur restent exceptionnelles (fractures de la clavicule, luxations de l'épaule, fractures du scaphoïde) ou du crâne (voûte, base).

Les lésions du crâne et des membres supérieurs s'observent généralement dans des traumatismes graves (parachutistes confirmés sautant en montagne par ex).

5.3.4.2.5. Les séquelles traumatiques tardivement révélées (52)

Au cours de chaque saut, même normalement accompli, des microtraumatismes naissent et leur effet additif reste encore difficile à apprécier. Il faut pouvoir les distinguer de phénomènes arthrosiques banaux chez un personnel qui a parfois de nombreuses années de service dans les Troupes Aéroportées.

M.J. TEYSSANDIER (52) (239) a décrit le syndrome vertébral du parachutiste. Il apparaît à n'importe quel âge, dans un délai variable avec la fréquence des sauts, et leur nombre. La douleur est la manifestation clinique qui se révèle sous deux formes distinctes :

- . l'une chronique, la plus fréquente,
- . l'autre aigüe, plus marquante.

1. Les algies aigües, apparaissent les premières, se greffant généralement sur un fond d'algies chroniques. Elles sont habituellement déclenchées par un effort ou le plus souvent par un traumatisme. Ces douleurs, le plus souvent localisées, s'accompagnent parfois d'irradiations de type radiculaire, en ceinture, en barre. Elles siègent le plus souvent au niveau de la colonne lombaire et de la colonne dorsale basse. La contracture des muscles paravertébraux amène une impotence fonctionnelle notable et des attitudes antalgiques (52).

2. Les algies chroniques sont, d'après J.M. TEYSSANDIER, extrêmement fréquentes chez les parachutistes. Ces algies parfois diffuses sont en général localisées à un segment rachidien bien précis. Elles ne s'accompagnent généralement d'aucune irradiation radiculaire.

Calmées par le décubitus, accrues par la station assise prolongée plus que par la station debout, ces douleurs augmentent naturellement au fur et à mesure que la journée approche.

L'examen clinique révèle une mobilité du rachis plus ou moins diminuée. Les masses musculaires latéro-rachidiennes sont hypotoniques et atrophiées. L'examen

radiologique, dans plus de la moitié des cas (239) révèle l'existence d'une affection antérieure au parachutisme ou acquise (arthrose, séquelles d'épiphysose de Scheuermann).

L'absence de dossier radiologique antérieur à l'admission dans les Troupes Aéroportées ne facilite pas la recherche étiologique. Certaines lésions acquises (arthrose en particulier) sont dans certains cas difficiles à rattacher au traumatisme causal. Des études prolongées, basées sur des examens cliniques et radiologiques échelonnés, permettront peut être d'affirmer ce qui revient à la pratique professionnelle du parachutisme.

5.3.4.3. LE PARACHUTISME SPORTIF

Actuellement, la Fédération Française de parachutisme groupe plus de 9500 licenciés. En milieu militaire cette pratique sportive n'est pas négligée, tout particulièrement dans l'Armée de l'Air qui anime de nombreuses sections de sports aériens. Les athlètes militaires sont du fait, largement représentés dans nos équipes nationales de parachutisme.

5.3.4.3.1. Conditions générales de la pratique sportive.

1. Différences avec la parachutisme militaire

Les conditions générales de pratique sportive du parachutisme : nature des pratiquants, les matériels et techniques employés, diffèrent considérablement du parachutisme militaire.

L'esprit du parachutisme sportif diffère fondamentalement de celui pratiqué par les militaires. Dans ce dernier cas, le parachute est un moyen de transport destiné à amener un combattant muni de son équipement en un point déterminé pour participer à une action de combat. Il faut passer la porte, atterrir à l'endroit désigné en courant le moins de risque possible en se posant.

En pratique sportive, la préoccupation de passer la porte n'est majeure en fait que dans les premiers sauts d'école. Très rapidement, cette notion est dépassée par celle de la "bonne sortie".

Le saut en ouverture automatique n'est qu'une brève étape dans la carrière d'un parachutiste sportif. L'altitude de saut standard est dans ce cas de 700 m. L'élève doit accomplir au minimum 10 sauts en utilisant un dispositif automatique avant de pouvoir accéder en fonction de ses capacités, à l'ouverture commandée. Ce terme signifie que l'ouverture du parachute résulte d'un acte volontaire du parachutiste et non d'une séquence automatique.

L'un des buts à atteindre dans les sauts en automatique est d'acquérir une position stable à la sortie de l'avion, en vue d'assurer l'ouverture du parachute dans de bonnes conditions. A partir du moment où le parachutiste est capable de commander lui-même l'ouverture de son parachute, il va passer à l'étude de la chute libre, avec ouverture retardée du parachute. Cette phase consiste à acquérir une maîtrise de la position stable du corps en chute libre. Les altitudes de saut varient en règle générale de 1.000 à 1.500 mètres et les temps de chute libre augmentent progressivement de 3 à 20 secondes.

La phase suivante verra le parachutiste rapidement atteindre une altitude de 2.000 mètres et apprendre les bases élémentaires des évolutions aériennes, orientation, rotation; translation. Il est alors jugé capable d'accéder à des évolutions plus compliquées, tonneaux, loopings, chute dos, ou encore à pratiquer les enchaînements de figures, de voltige de compétition. Il peut également s'orienter sur l'apprentissage des techniques de vol relatif.

Parallèlement à l'étude de la chute libre, un autre aspect est progressivement développé. A la notion élémentaire de sécurité à l'atterrissage vient s'ajouter la notion de précision à l'atterrissage. Il est évident que ce deuxième élément ne doit jamais mettre le premier en danger, surtout pendant les phases d'écoles. La pratique de la compétition amène parfois à adopter une position marginale dans ce domaine.

Les parachutistes militaires ne réalisent en moyenne qu'un très faible nombre de sauts dans le strict cadre militaire. Beaucoup de parachutistes sportifs ont une activité très soutenue qui les conduit à effectuer un grand nombre de sauts au cours d'une année. Cette notion est quelque peu contrebalancée par le fait qu'une bonne partie des nouveaux pratiquants abandonnent très rapidement.

Enfin, si l'échantillon des personnels militaires est très homogène, regroupant de jeunes hommes en pleine possession de leurs moyens physiques, l'échantillon sportif l'est beaucoup moins sur les plans de l'âge, du sexe et de la condition physique.

2. Les pratiquants :

Il est couramment admis que toute personne jouissant d'un état de santé satisfaisant, et après une visite médicale d'aptitude, peut pratiquer le parachutisme sportif.

Sur le plan du rachis, il n'est pratiqué qu'un examen clinique. L'examen radiologique n'est pas obligatoire mais fortement recommandé au moindre doute. La limite d'âge inférieure est 17 ans. Il n'existe pas de limite d'âge supérieure et dans ce cas, la décision d'aptitude est laissée au bon sens du médecin examinateur. Il n'y a pas de limitation du poids des candidats, qui doit seulement être en rapport avec la taille.

En ce qui concerne le sexe, la proportion hommes/femmes peut être grossièrement estimée à 2/3 hommes et 1/3 femmes.

5.3.4.3.2. Matériels utilisés par le parachutisme sportif

En pratique militaire, les équipements sont standardisés. Dans le parachutisme sportif, l'hétérogénéité du matériel doit être soulignée et nous n'envisagerons que les différents types de voilures utilisés le plus couramment.

Les parachutes sportifs se différencient par la conception de la voile qui conditionne leurs possibilités d'utilisation.

1. Les parachutes hémisphériques et dérivés (fig 87)

Ces parachutes de débutants ont des voiles ayant les mêmes caractéristiques que les parachutes des Troupes Aéroportées. De plus en plus, on utilise en école des voilures rondes munies de fentes, permettant une meilleure orientation à l'atterrissage et autorisant certaines manoeuvres d'évitement d'obstacle.

2. Les voilures à tuyères (fig 88)

Conçues par l'Ingénieur Français LEMOIGNE, ces voilures ont été employées en compétition de 1964 jusqu'à ces dernières années. Elles sont maintenant dépassées pour les compétitions de haut niveau, mais restent utilisées en école avancée et comme parachute d'initiation à la compétition. Ces voilures à tuyère permettent d'obtenir une vitesse propre horizontale maximale de 5 à 6 m/s pour une vitesse de descente de 5 m/s sous 100 kg de charge. Par des manoeuvres appropriées, on obtient un freinage efficace, allant jusqu'à l'annulation et dans une certaine mesure l'inversion de la vitesse propre. Ces voilures autorisent une très bonne précision à l'atterrissage mais sont actuellement supplantées par les parachutes ailes ou voilures planantes.

3. Voilures planantes (fig 89 et 90).

Ces voilures utilisent les mêmes principes qu'une aile d'avion. Elles donnent une grande marge d'évolution. La finesse peut dépasser 2 et même 3 dans le cas optimum. Une telle finesse est considérable pour un parachute.

Aux mains d'un parachutiste entraîné ce type de voile est un excellent engin de compétition, qui permet de réaliser d'une façon très fiable d'excellentes précisions d'atterrissage, même dans des conditions météorologiques difficiles. Elles ont en fait considérablement modifié la physionomie des compétitions de précision d'atterrissage. Toutefois, comme les ailes d'avion, ce type de voile peut " décrocher " c'est à dire perdre toute portance. Il se produit alors un accroissement immédiat et considérable de la vitesse en descente. On comprend que cette configuration puisse être très dangereuse spécialement lorsque le sol est proche.

Par contre, utilisée dans le sens de la sécurité maximale (figure 91) ce type de voile autorise des atterrissages très doux, en annulant presque totalement vitesse horizontale et vitesse de descente au moment du contact, et ce même avec des vents forts. Sur le plan de la fiabilité à l'ouverture, des progrès très importants ont été réalisés par rapport aux premières générations d'ailes. L'expérience journalière montre cependant qu'il persiste un risque inhérent à cette conception de voile, lors de l'ouverture.

5.3.4.3.3. Traumatologie rachidienne en milieu sportif

Les deux activités : parachutisme militaire, parachutisme sportif sont bien différentes. Y-a-t-il le même caractère dans la traumatologie rachidienne?

1. Recueil des informations

Il existe une certaine difficulté à obtenir des données statistiques concernant la traumatologie du parachutisme sportif. Cette difficulté est liée à 3 facteurs :

- la dissémination des plate formes de saut,
- l'absence de centralisation locale des soins,



Figure 87 : Parachute hémisphérique
manoeuvrable E.F.A. 65-20

C'est un parachute d'Ecole muni
d'une fente située à l'arrivée du
parachute autorisant ainsi les
rotations.

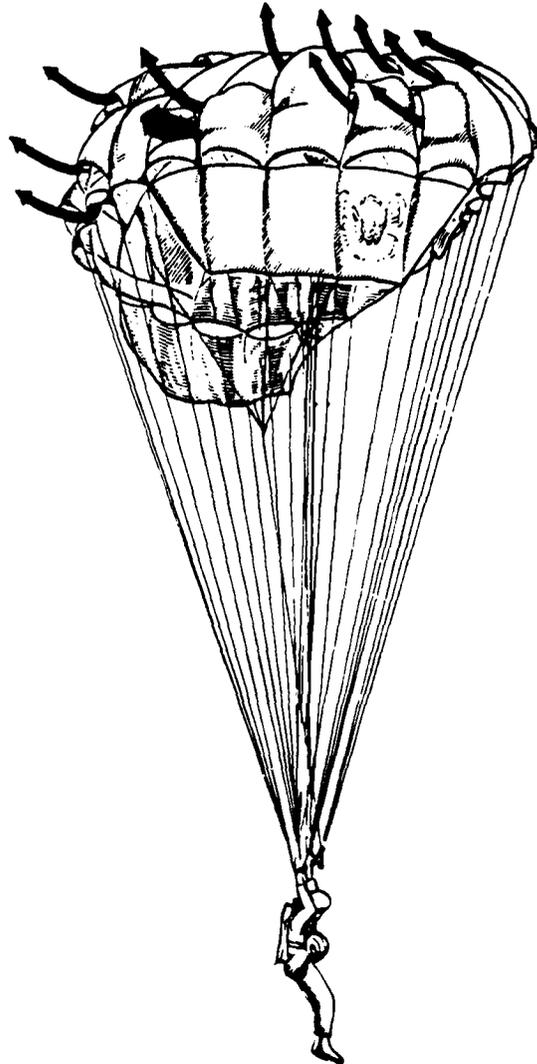


Figure 88 : Parachute Olympic 657-11

Il s'agit d'une voile dite
à tuyère.
(Extrait du manuel de vol
E.F.A.)

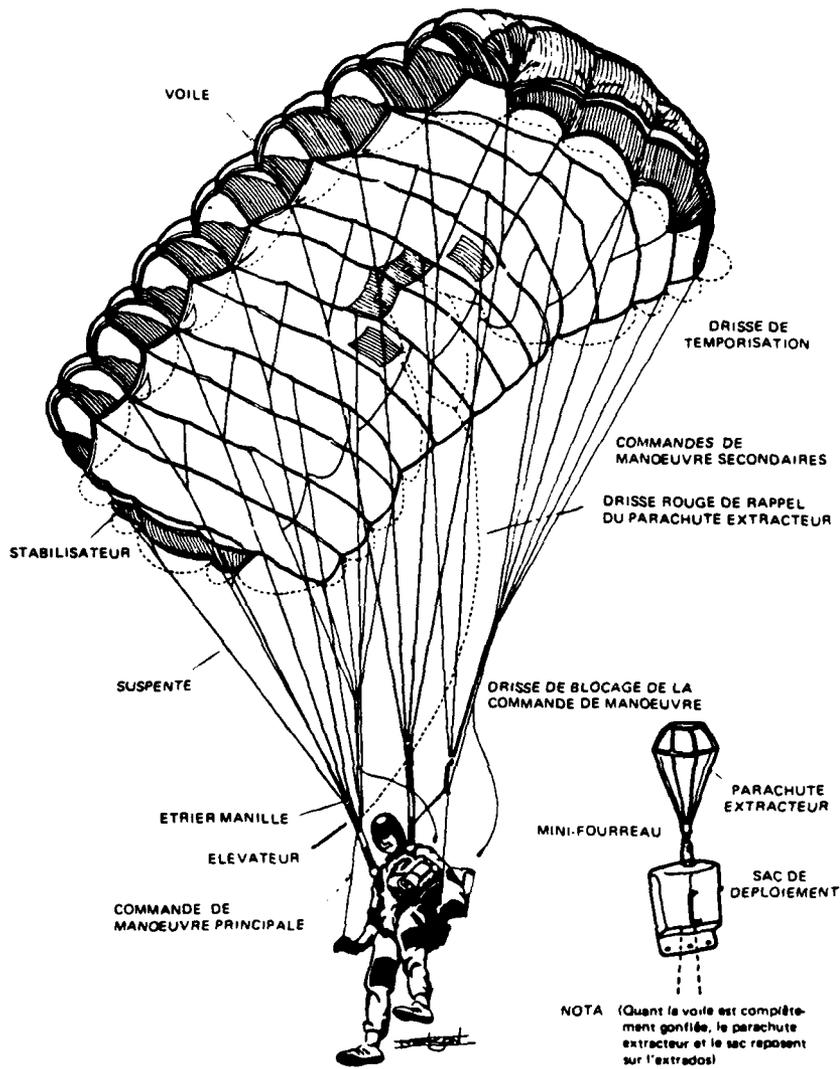


Figure 89 : Parachute type "Aile" STRATO-CLOUD (Extrait du manuel de vol EFA)

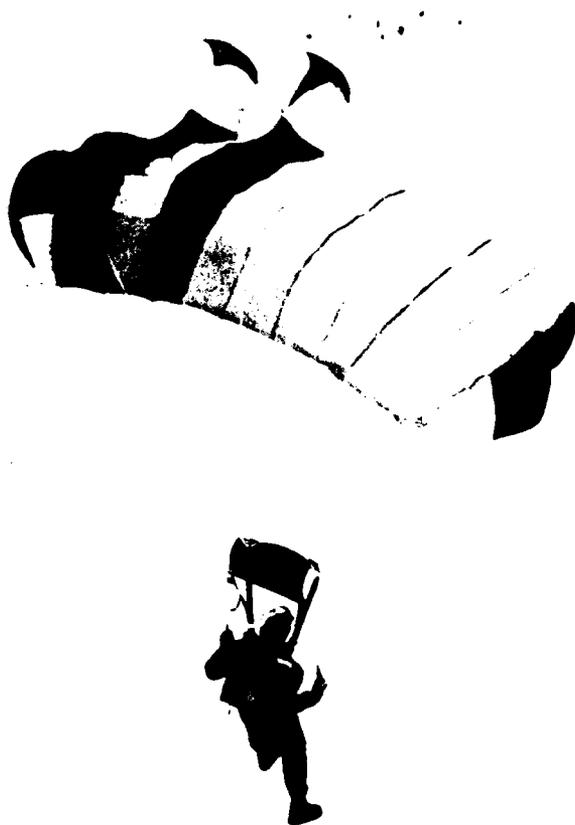


Figure 90 : Parachute type "Aile" STRATO-FLYER en
approche finale.

On note les dimensions réduites de la
voilure et la faible longueur du cône
de suspension.

- l'absence de déclaration détaillée à un organisme centralisateur.

Pour pratiquer le parachutisme sportif, une assurance est obligatoire. A. LEGER (159) a exploité les renseignements médicaux en possession de la principale société assurant les parachutistes. Cette analyse a été rendue difficile par l'insuffisance de détails dans l'énoncé des diagnostics. La détermination du siège de la lésion est parfois la seule donnée identifiable.

2. Résultats de l'enquête

De 1968 à 1974 inclus, 214 traumatismes rachidiens sont enregistrés, ce qui représente 9,30% de la traumatologie du parachutiste sportif.

Le tableau 5-14 donne la répartition des fractures et traumatismes rachidiens.

	Total	Hommes	Femmes
Fractures vertébrales	57	39	18
Traumatismes rachidiens sans fracture	95	76	19
Lésions sacrum et coccyx	62	26	36
	214	141	73

Tableau 5-14 d'après A. LEGER (159)

Il apparaît intéressant de comparer ces résultats à ceux observés en parachutisme militaire.

	Parachutisme militaire (1)	Parachutisme sportif (2)
Pourcentage de la traumatologie par rapport au nombre de sauts	8,3	9,3
Nombre d'accidents	11.533	1.315
Nombre de traumatismes vertébraux (y compris fractures)	957	214
Nombre de fractures du rachis	155	57

Tableau 5-15 : Comparaison traumatologie

Parachutisme militaire et sportif

(1) d'après R.P. DELAHAYE, M.J. TEYSSANDIER (52)

E.T.A.P. Pau, 1959 à 1966 inclus

(2) d'après A. LEGER (159) 1968 - 1974

Si le nombre de sauts apparaît peu différent (1.100.000 en pratique sportive, 1.330.000 en parachutisme sportif), le nombre de traumatismes vertébraux est plus faible chez les sportifs (rapport de 4,5 à 1). Par contre, le nombre de fractures est plus élevé en pratique sportive (57 sur 214 traumatismes rachidiens, soit 26,64%) contre 16,7% en parachutisme militaire. Vraisemblablement, beaucoup de traumatismes mineurs de la colonne vertébrale ne sont pas enregistrés et que des fractures soient méconnues faute de contrôle radiographique. En pratique sportive, il existe beaucoup d'atteintes sacro-coccygiennes plus fréquentes chez les femmes.

La répartition des fractures ne présente pas de caractère particulier : localisations préférentielles au niveau de D10, D11, L1, L2 avec une plus grande fréquence au niveau de L1, rareté de l'atteinte du mur postérieur, faible incidence des complications neurologiques. Les fractures surviennent lors de l'atterrissage, ou lors de collision en chute libre.

5.3.4.3.4. Le vol relatif (fig 92 et 93)

On appelle vol relatif le travail effectué par des parachutistes en chute libre, dans le but d'évoluer relativement les uns par rapport aux autres, jusqu'à ce qu'un

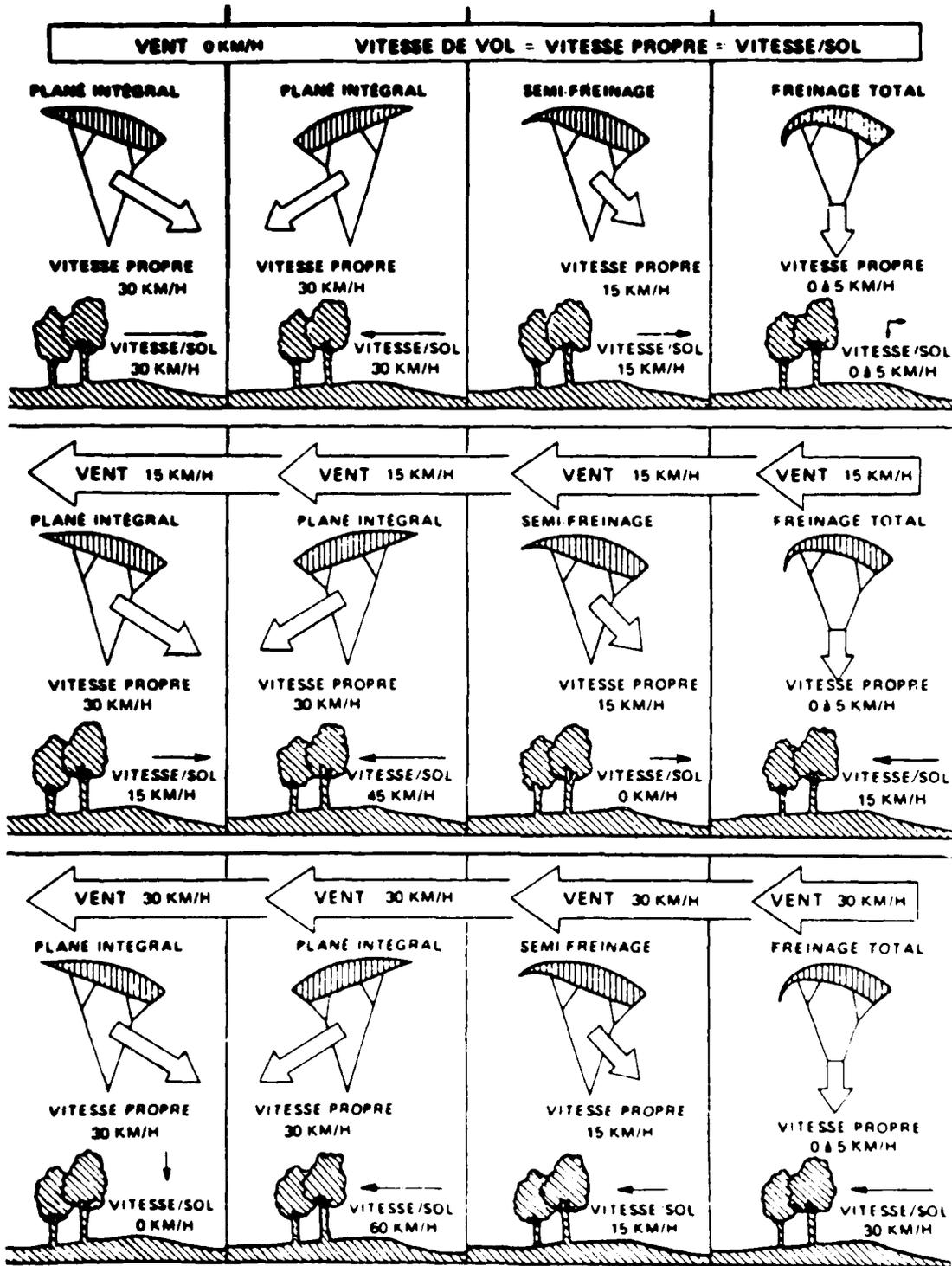


Figure 91 : Possibilités et performances d'un parachute type "Aile"
 Extrait du manuel du vol STRATO-CLOUD EPA

contact physique soit établi entre deux ou plusieurs de ces parachutistes. Ce travail peut se prolonger par l'exécution de séries de figures effectuées en groupe, selon une séquence prédéterminée.

Ce type de travail a été pratiqué par certains parachutistes confirmés depuis les débuts du parachutisme sportif. Il n'a connu, ces dix dernières années, un développement très important que sous l'impulsion des chuteurs américains.

La technique comporte très schématiquement deux aspects. Régler sa vitesse verticale de chute en faisant varier la surface exposée au vent relatif (variation de la traînée) Créer une portance, en jouant sur la position des membres ou segments de membres, en permettant ainsi la translation. La combinaison de ces deux éléments fondamentaux nécessite un dosage rigoureux, surtout dans les moments délicats que représente l'appontage d'un autre parachutiste ou d'un groupe de parachutistes (fig 92).

Les risques de collision sont présents dans toutes les phases du vol :

- après la sortie de l'avion lorsque le parachutiste cherche à rattraper très rapidement les premiers,
- au moment de l'appontage si la vitesse sur trajectoire est insuffisamment contrôlée,
- au moment de la séparation lorsque chacun est occupé à s'éloigner à la recherche de son point d'ouverture.

Sur le plan pratique, le vol relatif n'est réellement pas plus dangereux que les autres aspects du parachutisme. C'est du moins ce que prouve l'examen des activités de ces dernières années. Cette discipline implique toutefois pour rester sûre, une technique personnelle éprouvée et l'observation de règles de sécurité strictes.

Sur le plan de la traumatologie rachidienne, les collisions en vol peuvent donner lieu à des lésions graves. Dans ce domaine, tout dépend de la partie du corps qui percute et qui est percutée, ainsi que des vitesses relatives des parachutistes.

Les rachis dorsal et lombaire sont relativement bien protégés par le sac du parachutiste. Par contre la colonne cervicale est beaucoup plus exposée.

Il faut toutefois signaler que sur douze cas de collision en vol avec blessure, RAVALEC (190) n'observe pas de fracture du rachis. Il note l'existence de quelques " traumatismes cranio cervicaux ".

Par contre, depuis 1978, dans les Hôpitaux d' Instruction des Armées BEGIN et Dominique LARREY, nous avons suivi quatre fractures : 1 fracture de la septième vertèbre cervicale, 1 des apophyses épineuses de C6-C7, 1 des apophyses transverses de L3-L4, du sacrum du bassin (collision en vol), 1 fracture de L3-L4 (apophyses transverses).

D'un autre côté, la survenue d'une lésion cervicale grave en chute à toutes les chances d'amener une issue fatale, en l'absence d'un dispositif d'ouverture chrono-barométrique ou de circonstances très spéciales (choc au moment de l'ouverture du parachute).

5.3.4.3.5. La précision d'atterrissage

La pratique de la précision à l'atterrissage en compétition propre au parachutisme sportif est source d'un certain nombre de lésions rachidiennes.

En effet, il ne s'agit plus de réaliser l'atterrissage le plus sûr possible mais de se poser sur un point donné, avec meilleure précision possible. Ce genre d'exercice s'exécute sur cible aménagée, généralement en petit gravier rond. Le point d'impact optimum est matérialisé par un plot rond de 10 cm de diamètre (figure 94).

Le parachutiste qui parvient à poser le pied sur le plot lors de son atterrissage est gratifié de la meilleure précision (0 m, 00), ou " carreau " en jargon parachutiste. Plusieurs manches sont généralement réalisées. A chaque saut la précision du saut est mesurée en prenant la distance entre le bord du plot central et le premier point d'impact du sujet. Les parachutistes confirmés apprennent vite à réduire cette distance à son minimum en tenant la jambe vers le plot, ou carrément en projetant tout le corps lors de l'atterrissage (figure 95).

Ces manoeuvres, compte tenu du fait que le parachutiste aborde le plus souvent la surface d'une manière tangentielle, ne sont en fait que peu dangereuses. Toutefois, lorsque la vitesse verticale se trouve accrue, l'absence relative d'amortissement au niveau des membres inférieurs, et les forces qui sont mises en jeu à l'atterrissage, conduisent parfois à des traumatismes rachidiens (fig. 96). L'augmentation brutale du taux de descente du parachute, peut être due à une fausse manoeuvre (décrochage au ras du sol) ou à une manoeuvre de rattrapage trop brutale (rotation rapide, etc ...) Il n'est, ainsi pas rare d'observer des fractures du rachis, en compétition ou à l'entraînement chez des parachutistes ayant poussé jusqu'à la limite leur esprit de compétition.

Dans le vol relatif et dans l'épreuve de précision à l'atterrissage, l'intérêt représenté par le rachis en matière de traumatologie du parachutisme ne repose pas sur des

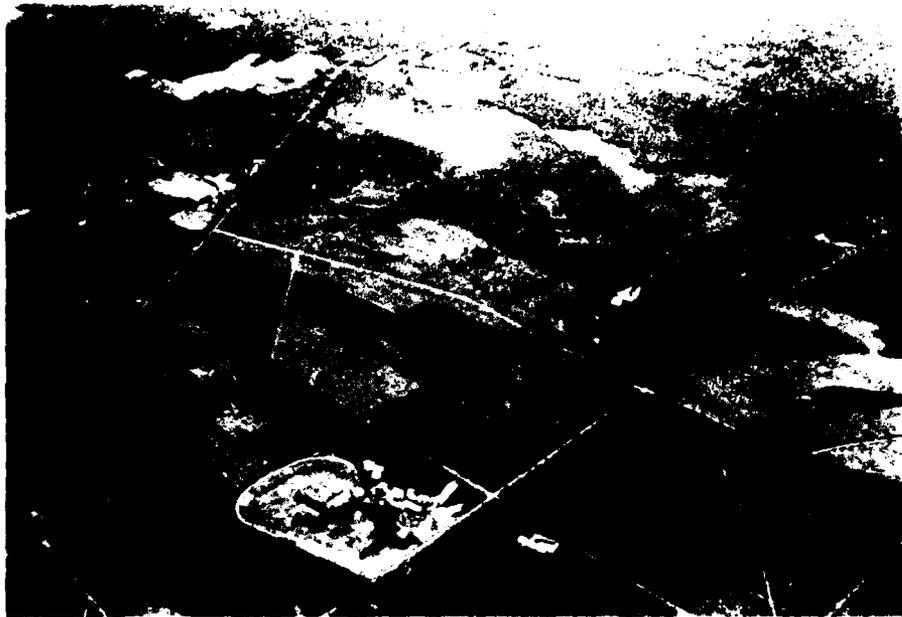


Figure 92 : Vol relatif : formation d'une étoile à six.
On note que 2 parachutistes à droite approchent de la formation à quatre.



Figure 93 : Etoile à six.

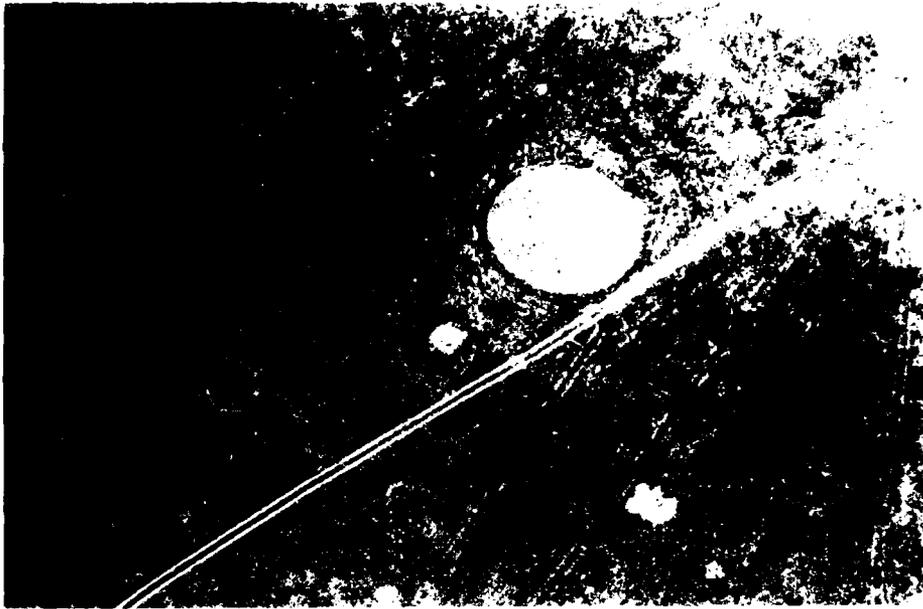


Figure 94 : Précision d'atterrissage.
Cible aménagée pour la précision d'atterrissage.
Un parachute de type Olympic est en approche.



Figure 95 : Précision à l'atterrissage. Voilure de type Olympic.
On note la position d'atterrissage
jambe droite en extension complète
à la recherche du plot central,
corps presque sorti du harnais.

bases quantitatives. Les atteintes du rachis arrivent en effet bien loin derrière les lésions des membres inférieurs. Par contre, les conséquences aiguës ou à long terme des traumatismes rachidiens doit inciter à en assurer au maximum la prévention.

5.3.4.4. LE VOL LIBRE (figure 97)

Le vol libre est une discipline nouvelle représentant une sorte d'intermédiaire entre le planeur et le parachutisme. Par les techniques de pilotage, les matériels employés, le vol libre se rapproche, indéniablement beaucoup du planeur. Par contre, l'adepte du vol libre partage avec le parachutiste l'absence totale de protection en cas de crash ou de collision. C'est au moment du décollage avec le risque majeur de " retour à la paroi " mais surtout lors de fausses manoeuvres à l'atterrissage (décrochages, mauvaises conditions météorologiques) que peut se présenter l'éventualité d'une traumatologie rachidienne. Dans les cas sérieux, il s'agit d'ailleurs plus de polytraumatismes peu spécifiques de cette activité sportive.

Les problèmes mal résolus de réglementation et d' Ecole qui se posent à cette jeune discipline expliquent en partie la lourde morbidité observée : décès fréquents, lésions graves notamment traumatismes du thorax, des membres inférieurs et du rachis.

5.3.4.5. LIMITES HUMAINES DE TOLERANCE AUX IMPACTS EN CHUTE LIBRE

- SOMMAIRE PARTICULIER -

- | |
|--|
| 5.3.4.5.1. Définition |
| 5.3.4.5.2. Moyens d'étude |
| 5.3.4.5.3. Facteurs physiques |
| . Amplitude |
| . Direction des forces |
| . Distribution des forces |
| . Surface de réception |
| . Durée |
| 5.3.4.5.4. Facteurs biologiques |
| 5.3.4.5.5. Impacts sur l'eau |
| 5.3.4.5.6. Impacts à vitesse terminale |

5.3.4.5.1. Définition

On appelle chute libre, une chute freinée (saut ou plongeon d'un point connu à un autre point connu). Cette définition empruntée à R.G. SNYDER (230) exclut les chutes dans les escaliers, les chutes à partir de falaises ou de montagnes ou des impacts multiples peuvent être invoqués.

5.3.4.5.2. Moyens d'étude (227)(228)(230)

Les informations sur la résistance humaine aux impacts résultent de nombreuses techniques.

Des sujets volontaires, souvent des jeunes adultes lors d'expériences contrôlées, sont employés. Les limites s'expriment en fonction de critères subjectifs. Malheureusement, l'intérêt de telles recherches semble très limité. En effet, ces données recueillies ne sont pas applicables en toute sécurité à des tranches étendues de population (enfants, femmes, vieillards par exemple). Pour beaucoup d'auteurs, les résultats observés constituent la source la plus sûre des effets physiologiques des impacts mettant en jeu des forces de faible niveau.

Quand les limites explorées deviennent dangereuses pour l'homme, on fait appel à des mannequins anthropomorphiques, à des cadavres humains et à des animaux anesthésiés (singes) Des données très intéressantes d'estimation de la résistance humaine ont été enregistrées, mais la valeur des résultats doit être sérieusement discutée. Aucun mannequin, aucun cadavre ne fournissent de données physiologiques. L'extrapolation à l'homme des valeurs obtenues lors d'expérimentations animales doit toujours être interprétée avec une extrême prudence.

Des investigations très élaborées ont fourni, lors d'accidents d'automobile ou d'aviation, des informations valables bien que la détermination des forces mises en jeu et des conditions d'environnement soient parfois difficiles à déterminer avec précision.

Malgré le mauvais fonctionnement de leur équipement, des parachutistes sportifs ou militaires survivent à de sévères forces d'impact. Certains pilotes ou membres d'équipage d'avions ont sauté d'avions en vol, sans parachute, et ont survécu.



Figure 96 : Précision à l'atterrissage -
Arrivée court avec projection de tout
le corps en avant, l'appui étant réa-
lisé par une traction sur les élévateurs
arrière.



Figure 97 : Vol libre - Départ en Delta plane

Des chutes, généralement lors de tentatives de suicide, ont été systématiquement étudiées, en particulier à SAN FRANCISCO (Golden Gate Bridge) et en AUSTRALIE (Sydney Harbour Bridge).

Les différents facteurs qui interviennent dans le déterminisme de ces lésions ont été particulièrement étudiées par R.G. SNYDER (227)(228)(230) tout d'abord à l' Office Aviation Medicine d' OKLAHOMA City (Federal Aviation Agency) puis à l' Institute of Science of Technologie de MICHIGAN.

5.3.4.5.3. Les facteurs physiques sont les plus importants.

La complexité de l'analyse des chutes libres tient au grand nombre de facteurs d'environnement qui influencent parfois à des degrés divers la nature, l'importance et la sévérité des lésions. Certains sont calculés et mesurés.

1. Amplitude

Il n'a pu être démontré de relation directe entre hauteur de chute et l'importance et la gravité des blessures en résultant. R.G. SNYDER (230) observe que 90 individus survivent après des chutes libres variant entre 30 et 274 mètres, 9 sont vivants après une chute supérieure à 300 mètres.

L'amplitude des forces atteint, dans certains impacts, 35 à 300 G selon les circonstances de la chute libre. Si la déformation de la surface de réception est mesurable, il est possible de déterminer la valeur du facteur G avec une précision satisfaisante. Par contre, en cas d'atterrissages sur des surfaces de béton, d'acier, de granit, les forces calculées sont 70 à 100 fois plus grandes que celles observées dans des expérimentations avec des volontaires.

La distance entre points de départ et d'arrivée pouvant être calculée, on démontre que la vitesse du sujet en chute libre au moment de l'impact intervient. Au niveau de la mer, il suffit d'une chute de 146 mètres pour obtenir la vitesse limite de 162 km/H mais il faut tenir compte que la résistance de l'air modifie la vitesse de chute du corps humain.

2. Direction des forces

L'orientation du corps modifie la nature, l'importance, et la sévérité des lésions.

Les chutes tête première (Gz -) sont les moins tolérables (sauf dans l'eau). Dans les impacts pieds premiers (Gz +), les atteintes les plus graves siègent au niveau des pieds, des chevilles et des jambes, mais des fractures du rachis, très importantes, ne sont pas rares.

Dans les impacts en position assise, les fesses touchant les premières, les lésions vertébrales et pelviennes dominent.

Dans les impacts transversaux (Gx ±), les lésions des extrémités supérieures, du thorax, du rachis, du bassin sont le plus fréquemment rencontrées.

3. Distribution des forces

De HAVEN (1942) démontre que plus la surface d'application de la force est grande, plus la contrainte par unité de surface est faible. Ce concept est valable partout sauf pour les chutes dans l'eau. Là, plus la surface de contact est petite, plus il y a des chances de survie à une grande vitesse d'impact. Dans l'eau, pour les impacts pieds premiers (Gz +) où la surface de contact est faible (430 cm² en moyenne pour l'homme, 290 cm² pour la femme (230) l'orientation du corps entraîne le minimum de lésions.

L'amortissement des membres inférieurs dépend de la position des genoux. Les impacts genoux verrouillés permettent des transmissions de force 4 à 6 fois plus importantes que lors des mêmes impacts genoux fléchis. Des facteurs importants comme l'âge, la souplesse relative des membres, l'expérience acquise dans l'entraînement des Troupes Aéroportées.

4. Surface de réception

La déformation plus ou moins importante du matériau percuté joue un rôle dans le déterminisme des lésions. La neige possède une résistance à la compression variant en fonction de facteurs divers comme la température, sa structure cristalline, sa densité.

La pénétration dans l'eau et la durée de la décélération sont d'autant plus élevées que la surface de contact de l'impact du corps humain est plus petite. Les chances de survie en sont d'autant plus grandes.

5. La durée

de l'application des forces de l'impact est la valeur la plus importante dans la détermination de la tolérance humaine aux impacts. En chute libre, ce temps est généralement bref (quelques centièmes à quelques millièmes de seconde).

STAPP (293) a démontré que si la durée d'impact est inférieure à 0,2 seconde, les tissus réagissent par des dommages de leurs structures. Ils se comportent comme une substance inerte soumise aux conditions de l'atteinte mécanique (233).

Au cours de certains impacts (saut par la fenêtre d'un immeuble de 6 étages) des vitesses moyennes * de 20 m/seconde sont déterminées. La déformation du matériau de réception (béton) due à la force appliquée durant cette période de temps est suffisamment efficace pour favoriser la décélération du corps qui ne présente que des lésions minimes.

Actuellement, la plupart des auteurs avec R.G. SNYDER (230) estiment que l'insuffisance des différentes données déterminées au cours des très grandes vitesses d'impact, ne permet pas de comprendre la nature exacte de l'influence du facteur temps dans les impacts après chute libre. Les valeurs obtenues dans certains accidents, avec lésions peu importantes, excèdent de beaucoup les données prises pour base de survie lors des études expérimentales.

5.3.4.5.4. Facteurs biologiques

Il existe une relation étroite entre la condition physique et la tolérance à l'impact. Les plus grandes vitesses connues ont été observées chez des hommes et des femmes entraînés à tomber : cascadeurs, lutteurs, judokas, acrobates, parachutistes. La relaxation musculaire semble le facteur le plus important.

5.3.4.5.5. Les impacts sur l'eau

Les limites de tolérance humaine aux impacts aquatiques sont des valeurs directement applicables, lors des évacuations d'équipages d'avions de combat, lors des évolutions de parachutistes.

R.G. SNYDER (228)(230) étudie 54 cas de chutes libres non freinées, d'une hauteur égale ou supérieure à 15 mètres, donnant une vitesse d'impact variant de 60 à 193 km/h.

La répartition des lésions varie avec la direction des forces.

Si le corps est orienté pieds premiers, 32,3% ne présentent pas de lésions cliniquement décelables.

Les impacts pieds premiers créent :

- des contusions aux cuisses, aux fesses
- des fractures par compression du rachis (D12, L1)
- des hémorragies pulmonaires.

Vitesse d'impact (km/h)	Tête première Gz -		Impacts latéraux	
	Pieds premiers Gz +		+ Gx	+ Gy
25	3,5 G		18,6 G	
33	6 G		40 G	
62	16 G		112 G	
87	43 G		300 G	

Tableau 5-16 : Valeurs théoriques de la variation de l'amplitude G dans les impacts, dans l'eau, selon diverses orientations (d'après EARLEY et R.G. SNYDER (230))

Les impacts pieds premiers (Gz +) ou tête première (Gz-) permettent une pénétration et un temps de décélération plus importants (Tableau 5-16)

Les plongeurs professionnels d' ACAPULCO s'élançant de falaises de 30 à 40 mètres de haut. Le plus expérimenté a accompli 26.000 plongées de haut vol en 25 ans. Le contact avec l'eau a lieu à des vitesses de l'ordre de 90 km/h avec des décélé-rations de 40 à 45 G pendant l'immersion de la tête et des épaules. R.C. SCHNEIDER et Coll (204) constatent sur des radiographies l'existence d'anciennes fractures des vertèbres dorsales chez 4 des 6 plongeurs examinés. Les fractures siègent au niveau de D5 (1 cas) D5-D6 (2 cas), D2, D3, D4, D7 (1 cas). Ces mexicains plongent les bras en avant, le cou en légère hyperextension pour prendre contact avec le sommet de la tête. Une seconde technique consiste à plonger les mains écartées. Si par hasard, les mains frappent la tête au moment de l'impact, des fractures du cubitus, du radius, des métacarpiens apparaissent.

Ces travaux démontrent que la survie en impact aquatique est possible en position tête première à des vitesses atteignant 90 km/h, n'entraînant que des lésions minimes.

* pour une durée de décélération de 0,004 seconde.

R.G. SNYDER et SNOW (229) étudient 169 cas de suicide à partir du " Golden Gate " à San Francisco. La distance du parapet de ce pont à l'eau varie selon les marées de 72,9 à 79,6 mètres. Les vitesses atteignent 82 à 120 km/h. Les vérifications anatomiques de 52 femmes et de 117 hommes affirment que le mécanisme le plus courant du traumatisme mortel est l'écrasement de la cage thoracique avec de multiples fractures de côtes bilatérales dont les fragments pénètrent dans le poumon, le foie, la rate.

Les fractures de côtes surviennent dans 85,2% des impacts mortels. Dans 76% des cas, les poumons sont lacérés par la pénétration des fragments de côtes. Le foie éclate dans 53,8% des cas. Les traumatismes cardiovasculaires vont de la simple contusion à la rupture d'un gros vaisseau ou d'une cavité. Chacun des 87 cas de lésions cardiovasculaires (à l'exception de 5) est associé à de multiples fractures de côtes avec pénétration dans les cavités péricardiques ou pleurales. Dans 42 cas, une ou plusieurs cavités cardiaques sont rompues, l'oreillette gauche étant la plus vulnérable. Dans 45 cas, il existe une rupture traumatique ou une lacération d'un ou de plusieurs gros vaisseaux, les ruptures aortiques étant les plus fréquentes. 40 cas de fractures du crâne furent notés ainsi que 62 cas de lésions cérébrales (hémorragies sous arachnoïdiennes). Les reins sont moins fréquemment atteints -8 cas- : il s'agit de contusion, de lacération ou de rupture. 17 individus ne présentent pas de fractures. Dans 45 cas, la noyade est la cause probable du décès.

Ces lésions sont caractéristiques d'une chute où le corps heurte l'eau par l'avant, les côtes ou le dos transversalement (les forces résultantes sont de 300 G, pour une vitesse d'impact de 87 km/h).

La position du corps au moment de l'impact apparaît comme un facteur fondamental. 4 personnes sur 411 ayant chuté du Golden Gate Bridge de San Francisco, ayant pris contact avec l'eau, les pieds premiers, ne présentent aucune blessure. Dans les impacts aquatiques latéraux et transversaux, la cause principale des décès est due à la pénétration des fragments des côtes dans les organes thoraciques vitaux (R.G. SNYDER).

5.3.4.5.6. Impacts à vitesse terminale (227)(228)(230)

Le corps humain en chute libre atteint une vitesse constante quand une force équivalente de freinage par l'air s'oppose à la gravitation. Cette vitesse est de l'ordre de 162 km/h pour 147 mètres de chute libre au niveau de la mer.

La plupart des survies après impact à vitesse terminale s'observent après des chutes sur l'eau ou dans la neige. Plus rarement, la combinaison d'eau et de boue facilite la décélération.

En Indochine (Octobre 1950) lors d'un largage opérationnel à basse altitude (150 à 300 mètres d'altitude) se produit un défaut de fonctionnement du système d'ouverture automatique du parachute principal ainsi que du parachute ventral de secours. Ce parachutiste français arrive dans une rizière et son impact se produit pieds premiers. Il est enterré de 30 centimètres environ au dessus de sa tête. D'autres membres du commando atterrissant à côté repèrent le casque qui flotte. Ils saisissent les bras qui s'agitent et entraînent de la boue le parachutiste qui ne présente pas de blessure apparente. Lors de l'hospitalisation après évacuation, une fracture de la grosse tubérosité du calcanéum droit et gauche est diagnostiquée.

F.W. KIEL (149) rapporte un autre cas observé au cours des manoeuvres aéroportées en Alaska (Février 1955). Au cours de largage des hommes d'un bataillon, d'une hauteur d'environ 430 mètres par un jour clair, relativement chaud, un observateur remarque ce qui lui semble être un colis tombant d'un des avions C 119. Aucun parachute ne s'ouvre au dessus de cet objet. L'impact crée l'impression d'un obus de mortier explosant dans la neige. Quand les équipes d'assistance atteignent le lieu de l'incident, elles découvrent un jeune parachutiste noir étendu à plat sur le dos, au fond d'un cratère de 1,06 mètre creusé dans la neige. Il peut parler et ne semble pas souffrir de lésions. Lors de l'hospitalisation, on décèle une fracture incomplète de la clavicule droite, une fracture de L2 (tassement cunéiforme antérieur) et quelques contusions cutanées. La décélération moyenne calculée est de 141 G.

L'un des cas les plus étudiés de ce type d'impact à vitesse terminale est celui d'un mitrailleur de queue de la R.A.F., le Sergent Nicolas Alkemade qui saute d'un bombardier Lancaster en feu (230). Cet avion est abattu par un chasseur de nuit de la Luftwaffe, le 23 Mars 1944, à minuit. Son parachute étant situé à l'avant et ne pouvant l'atteindre à cause de l'incendie, cet Ecossais saute sans parachute d'une hauteur de 5.500 mètres. Au bout de 90 secondes, de chute libre à vitesse terminale, il heurte les branches chargées de neige de sapins, avant d'atterrir dans moins de 45 centimètres de neige à seulement 20 mètres du sol nu et dégagé. Les seules blessures de N. Alkemade étaient des brûlures antérieures au saut et des égratignures superficielles constatations médicales de Allemands.

Un autre cas plus récemment publié est celui de l'Adjudant radio-navigateur Jules Coqueron du groupe français " Tunisie " du Bomber Command (R.A.F.) Dans la nuit du 22 au 23 Janvier 1945 à bord d'un quadrimoteur Halifax 3 B, au retour d'une mission sur la Ruhr (Gelsenkirchen) le pilote de l'avion qui ne dispose plus que de deux moteurs

décide de rejoindre la base d' Elvington (G.B.) plutôt que de se poser sur un terrain de secours. A une altitude de 2.400 mètres, le feu prend dans un des deux moteurs restés intacts et atteint les portes du train d'atterrissage. Le feu redouble d'intensité et commence à envahir la cabine. L'ordre d'évacuation est donné et aussitôt une grande explosion retentit, suivie de la rupture du plan gauche. A 0 H 37, l' Adjudant Coqueron se dirige vers la trappe d'évacuation du navigateur, seule issue possible. Le navigateur étant coincé dans la trappe, Jules Coqueron en le bourrant de coups réussit à le dégager et passe la trappe. Son premier réflexe a été de tenter d'ouvrir son parachute. Malgré tous ses efforts, il n'est pas arrivé à déclencher l'ouverture. Les sauveteurs l'ont retrouvé avec le parachute plié dans son sac. En franchissant la trappe, J. Coqueron s'est fracturé la cinquième vertèbre cervicale et était très diminué du point de vue moteur. Il tombe dans un tas de neige situé au bout d'une allée en ciment dans le cour d'une ferme du sud de l' Angleterre. Il siffle pour appeler au secours et très rapidement est transporté dans un hôpital américain spécialisé, dans le traitement des grands blessés du rachis.

L'impact du Lieutenant Colonel I.M. CHISSOV des Forces Aériennes Soviétiques est aussi intéressant (230). En Janvier 1942, il est lieutenant navigateur d'un Illiouchine 4, attaqué par 12 avions Messerschmitt de la Luftwaffe. Il évacue la carlingue en feu. En raison de la présence des avions ennemis, il hésite à déclencher l'ouverture de son parachute et compte le faire à une altitude plus basse. Cependant Chissov a une perte de conscience et n'ouvre pas son parachute. Il a la chance d'atterrir au bord d'un ravin dont les pentes sont recouvertes de près d'un mètre de neige. Secouru par la cavalerie russe, il est hospitalisé pour une fracture du bassin et une contusion médullaire.

Les impacts à vitesse terminale s'observent parfois dans certaines conditions d'éjection (à basse altitude)(230). Il est possible qu'au cours de la phase dynamique, avant l'ouverture du parachute individuel, il y ait au cours d'éjections en régions montagneuses un impact du pilote avec des pentes recouvertes de neige. Plusieurs observations ont été rapportées aux U.S.A. par R.G. SNYDER.

ACCIDENT DE POMPAGE

Vi 516kt Mi 0 868 Zp 2060m

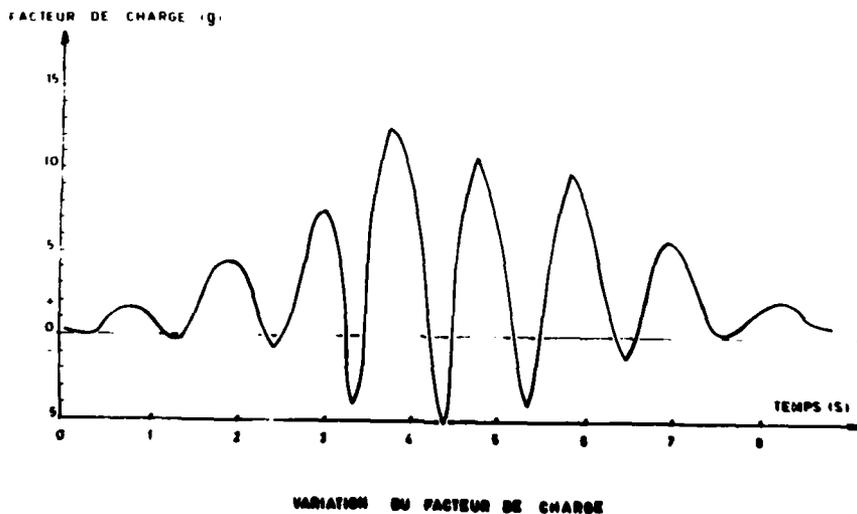


Figure 98 : Accident de pompage - Variation du facteur de charge

Vi = 516 Knots Zp : 2060 m.(C.E.V.Brétigny-sur-Orge)

CHAPITRE 5.3.5. LES FRACTURES DU RACHIS EN VOL

R.P. DELAHAYE et R. AUFFRET

S O M M A I R EINTRODUCTION

5.3.5.1. LES POMPAGES

1. Définition et description

2. Observations

3. Physiopathogénie

5.3.5.2. LES DEVERROUILLAGES DE SIEGE

5.3.5.3. LES TURBULENCES

Les fractures du rachis peuvent apparaitre chez un pilote d'avion de combat au cours d'une phase du vol.

Elles s'observent :

- au cours des phénomènes vibratoires rapides (pompages)
- au cours d'un déverrouillage intempestif du siège, incident entraînant la création d'une accélération supplémentaire ayant pour effet de tasser brutalement la colonne vertébrale.

Au cours d'une turbulence, le steward ou l'hôtesse, projeté contre les parois de l'avion ou les sièges, présente parfois une fracture du rachis. Plus rarement, au cours de séances de voltige, des entorses cervicales ont pu être décrites (36).

5.3.5.1. LES POMPAGES1. Définition et description (3)(8)(74)(138)(198)(245)

Le pompage est un phénomène connu sur avion depuis l'introduction des systèmes de commande asservis. Les auteurs anglo-saxons l'appellent " oscillations induites par le pilote ". Ce phénomène n'est pas particulier à l'aéronautique, il existe dans tous les systèmes homme machine utilisant des asservissements lorsque les corrections du pilote aboutissent à l'effet inverse du but recherché, par exemple à amplifier les mouvements d'un mobile alors que l'on cherchait à les amortir. Le pompage peut être à l'origine d'une perte de contrôle d'une automobile aussi bien que d'un aéronef (avion, hélicoptère).

En aéronautique les premiers pompages rapportés passèrent relativement inaperçus car fréquemment le facteur de charge produit par les oscillations restait relativement faible : ils ne provoquèrent ni accident, et n'eurent aucune incidence sur la structure avion ou la santé du pilote.

Cependant, sur avion aux commandes plus complexes et sophistiquées, lors de vols à grande vitesse on vit ces oscillations créer des dégâts à l'avion et des lésions au pilote. De plus, les risques potentiels du pompage lors des vols à basse altitude et même certains accidents obligèrent les avionneurs à étudier le phénomène et à améliorer les lois des commandes vol pour éviter des couplages néfastes homme-machine.

L'origine du pompage peut se trouver dans une sollicitation involontaire du pilote dans une action mal dosée du pilote ou bien dans une sollicitation extérieure au pilotage lui-même : turbulence atmosphérique, anomalie de fonctionnement de la servo-commande, etc

A vitesse élevée de l'avion, des mouvements de faible amplitude des gouvernes provoquent des mouvements de grande amplitude de l'avion. Les accélérations produites le plus souvent sur l'axe longitudinal de l'avion, entraînent une succession de facteur de charge + Gz suivie d'accélérations - Gz de valeurs élevées. La figure 100 montre les variations des accélérations enregistrées en vol lors d'un pompage (245)

Ces oscillations sont généralement amplifiées par les corrections qu'essaient d'y apporter le pilote, par son action sur les commandes du fait du déphasage possible des corrections. Ce déphasage est lié au décalage entre l'action du pilote et les réactions de l'avion.

En effet, pour des phénomènes rapides de l'ordre de 1 Hz, il a un retard dans la chaîne homme-avion, entre la sensation du pilote, entre la réaction du pilote et l'action sur les gouvernes du fait des délais de transmissions entre ces diverses étapes qui forment intervenir le temps de réaction humain mais aussi le temps de réaction des chaînes de servo-commande.

Les pompages peuvent survenir sur tous les systèmes de commande asservis pilotés donc sur les 3 axes de l'avion et également à faible vitesse avion lors des phases de vol près du sol (approche, atterrissage, décollage) avec les risques augmentés d'accidents que fait courir la proximité des obstacles.

Lors de certains pompages, l'absence de réaction du pilote améliorerait l'évolution de l'incident. Le pilotage très fin, "du bout des doigts" est certainement plus favorable que les actions musculaires mettant en jeu plusieurs segments de membre. De plus, lors des pompages importants, toute action coordonnée et volontaire du pilote est pratiquement impossible. Tout se passe très vite : l'importance et la rapidité des accélérations provoquent des mouvements incontrôlés et incontrôlables des bras, des jambes, de la tête. Heureusement dans la plupart des cas de pompage incontrôlable, à basse altitude, l'avion s'est placé tout seul ou par un début d'action volontaire d'un pilote qui cherche à assurer la sécurité immédiate, vers une trajectoire ascendante.

Ces oscillations entraînent parfois des déformations permanentes des structures de l'avion et de la voilure. La perte des charges extérieures de l'avion (bidons, engins, armements ...) est habituelle lorsque la limite de rupture des points d'ancrage est atteinte.

2. Observations

Observation I : Circonstances de l'accident (extraites du rapport d'enquête)

" Le pilote décolle en N°3 d'une patrouille de 4 Mirage III E pour une mission d'assaut. La phase de décollage se déroule normalement. En montée dans l'axe, passant par 1500 pieds à la vitesse de 300 noeuds, le pilote se met en palier et coupe la post combustion. Le vol en palier dure environ 5 secondes. Le pilote note : vitesse 300 noeuds, altitude entre 1.500 et 2.000 pieds. Le leader annonce virage à gauche. Châchant à rejoindre son leader, le pilote amorce un léger virage en inclinant l'avion de 10° à gauche et en exerçant une pression à cabrer sur le manche. Dès la première sollicitation des commandes, l'avion part très brutalement en piqué sous un angle de 20 à 30°, ailes sensiblement horizontales. Il s'agit d'une brutale abattée à G négatifs et non d'une oscillation passagère.

Le pilote tire sur le manche et enclenche la post combustion. Il a la sensation que son avion ne répond pas, bien que le manche soit secteur arrière. Il prend alors le manche à deux mains et le tire très fortement. L'avion part brutalement en cabré. Le pilote est alors violemment secoué, soumis comme il le dit "à de violentes embardées dans tous les sens" comme s'il ressentait les impressions d'agitation d'une vrille extrêmement serrée. Il se souvient avoir vu passer son carnet de procédures au moins trois fois de suite devant les yeux. Il ne peut pas lire le tableau de bord. Après un temps, que le pilote est incapable de chiffrer de manière approximative, le contrôle de l'avion est repris en cabré selon un angle de 30°, à l'altitude de 6.500 pieds. L'accéléromètre indique que les limites maximales en G+ et en G- ont été atteintes. Les aiguilles témoins sont bloquées à + 9,5 G et à -4 G. Le pilote constate alors la perte des réservoirs auxiliaires. (figure 98)

Le pilote a du mal à s'exprimer à la radio. Il branche l'I.F.F. Emergency c'est à ce moment qu'il commence à ressentir de violentes dorsalgies. Il rentre au terrain sans autre incident après des essais basse-vitesse. L'atterrissage est normal. Le réacteur est coupé sur la piste" (extraits du rapport d'enquête)

Souffrant de douleurs dorsales, le pilote évacue prudemment sa cabine, aidé par un autre pilote présent en bout de piste. Le sanglage du pilote sur le siège est particulièrement serré.

Causes de l'accident : Les investigations difficiles mais très poussées qui ont été entreprises par la Commission d'enquête ont déterminé que la cause initiale de l'accident est une défaillance mécanique brutale complexe portant conjointement sur deux éléments de la chaîne d'autocommande.

Dès que le pilote a sollicité les commandes pour déclencher un virage à gauche, cette double panne a provoqué le débranchement soudain de l'autocommande d'où le départ du manche secteur avant et le brutal piqué de l'avion selon un angle de 20° à 30° C.

Conséquences de l'accident : les accélérations subies.

Les conséquences de cette brutale défaillance mécanique ont été l'installation successive de différentes phases d'accélérations qui ont abouti à la création de fractures du rachis. Depuis le brutal départ de l'avion en piqué lors de la survenue de la

panne jusqu'à la récupération d'un avion normalement pilotable à l'altitude de 6.500 pieds environ, on observe une succession très brutale d'accélération positives et négatives se situant sur l'axe de tangage. Au cours de cette phase sont probablement intervenues des accélérations plus complexes. En effet, le pilote dit avoir l'impression d'effectuer une vrille vers le haut.

Effets pathologiques produits par les accélérations :

Dès la fin de l'accident, après la stabilisation de l'avion vers 6.500 pieds, le pilote ressent des douleurs dorsales. D'abord discrètes pendant la phase terminale du vol permettant au pilote d'effectuer un atterrissage normal, ces dorsalgies voient leur intensité s'accroître dans la demi-heure qui suit l'évacuation de l'avion.

L'examen clinique aussitôt pratiqué réveille ce syndrome douloureux, en particulier la percussion des apophyses épineuses dorsales, il n'est pas possible d'isoler une douleur localisée. Il existe par ailleurs une contracture généralisée des masses musculaires latéro-vertébrales. L'examen neurologique est normal.

Les radiographies standards de la colonne dorsale révèlent l'existence de deux fractures tassement de D4 et D8 avec déformation cunéiforme modérée. Le mur postérieur est respecté. L'aspect radiologique des segments cervical et lombaire est normal. Il n'est malheureusement pas possible de comparer cet aspect radiologique avec les clichés de référence. En effet, lors de la visite d'admission de ce pilote de chasse, les radiographies systématiques du rachis n'étaient pas obligatoires (Août 1957).

Les tomographies de profil pratiquées 4 semaines après l'accident confirment l'existence de lésions post traumatiques : fracture du coin antéro-supérieur de D4, fracture du coin antérieur et inférieur de D8. Le mur postérieur possède une structure et une morphologie normales.

Données évolutives :

Le syndrome douloureux dorsal régresse en quelques jours après repos absolu au lit et avec un traitement antalgique et décontracturant. Dès la disparition des algies aiguës, une gymnastique vertébrale douce et progressive est mise en train. 13 semaines après l'accident, le pilote est déclaré apte à la reprise progressive des vols après contrôle radiologique au C.E.M.P.N. de Strasbourg qui avait démontré l'apparition d'une consolidation excellente. La reprise des vols, sous surveillance médicale s'effectue sans incident notable.

Observation II : (d'après rapport d'enquête)

" Le pilote de Mirage III C, le 25 Juin 1972, au cours d'un vol basse altitude sur la Base (Journées Portes ouvertes) en patrouille légère, en position n°2, cabre en inclinant à gauche. Sans que le mouvement du manche à balai ne soit complètement effectué, l'avion part en oscillations d'une forte violence. En 1 seconde 5/10, 3 oscillations très brutales sont observées. L'accéléromètre est bloqué (- 5 G + 10 G) Le pilote déclare qu'il a l'impression que trois fois sa tête cogne les genoux. Le sanglage est correct. Au médecin enquêteur, le pilote signale l'existence de douleurs cervicales, dorsales et lombaires. Plus particulièrement, il ressent une violente douleur de la région lombaire basse. La maladie va évoluer vers un tableau progressif de sciatique hyperalgique par hernie discale de type L5 dont le traitement chirurgical d'exérèse a donné un bon résultat.

3. Physiopathogénie (fig. 99)

Deux types de lésions peuvent s'observer :

- les fractures,
- les hernies discales.

Le siège de ces lésions est conditionné par la valeur de la force d'éclatement du nucléus pulposus. Vers D9-D10 se situe la limite où expérimentalement commence le déplacement mécanique du disque lors d'un traumatisme vertébral.

C'est pourquoi dans la dizaine de pompages graves observés dans l' Armée de l' Air et le personnel des Essais (Brétigny sur Orge) on rencontre des fractures du rachis dorsal et une pathologie liée au déplacement du nucléus pulposus (hernie discale).

Les forces mises en oeuvre produisent des accélérations de haute amplitude et de durée brève, beaucoup plus importantes que ne l'indiquent les limites de l'accéléromètre qui est souvent bloqué (- 4 Gz à + 9,5 Gz). L'étiologie des fractures du rachis dorsal haut (D4 à D7) est constituée par une brusque variation du facteur de charge négatif à un facteur de charge positif. Mais un facteur additif qui n'existe pas dans une éjection intervient : la répétition excessivement rapide d'accélérations négatives et positives engendrées par les oscillations de l'avion sur son axe de tangage.

Les oscillations rapides (1 par seconde) modifient profondément la statique vertébrale :

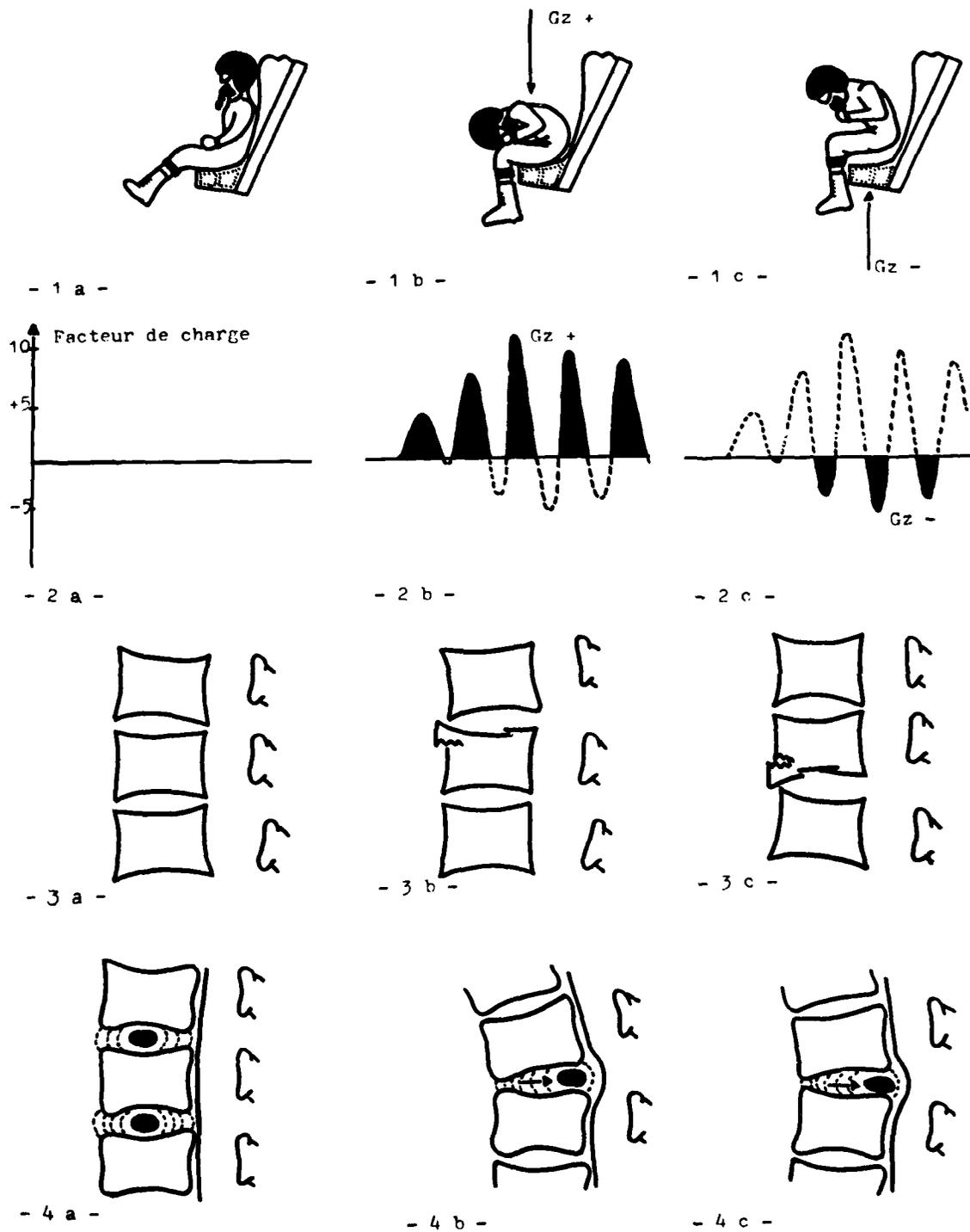


Figure 99 : Accident de pompage.

- 1) Influence des accélérations sur la position du pilote :
 - a) position normale
 - b) $Gz +$
 - c) $Gz -$
- 2) Variation du facteur de charge :
 - a) normal,
 - b) $Gz +$
 - c) $Gz -$
- 3) Action sur le rachis dorsal :
 - a) aspect normal
 - b) fracture du plateau vertébral supérieur
 - c) fracture du plateau vertébral inférieur.
- 4) Action sur le rachis lombaire
 - a) aspect normal
 - b) déplacement du nucleus pulposus pouvant aller jusqu'à la hernie discale
 - c) hernie peu influencée par l'accélération Gz .

- lors de la montée brutale de l'accélération + Gz, le pilote est tassé sur son siège, colonne en hyperflexion malgré le sanglage serré.

- 1/2 seconde après, survient l'accélération de sens opposé et le pilote est alors brutalement projeté vers le haut et décollé du siège, sans avoir eu complètement le temps de se tasser complètement.

Il s'agit de fractures par compression (mécanisme I ou II de Watson-Jones). Il est certain que la position assise asymétrique (une fesse moins enfoncée que l'autre) aggrave le problème des transmissions, des accélérations. Ces fractures peuvent intéresser :

- isolément un plateau vertébral supérieur ou inférieur,
- ou les deux plateaux généralement de deux vertèbres différentes : plateau vertébral supérieur de D4 et inférieur de D6, par exemple.

Au niveau de la colonne lombaire, l'hyperflexion chasse le nucléus pulposus en arrière par un mouvement rapide qui n'a pas le temps de se modifier de sens lors du changement d'accélération. C'est pourquoi une hernie discale peut être créée et se déclencher dans les suites immédiates d'un pompage grave avec toutes les variantes cliniques possibles.

5.3.5.2. LES DEVERROUILLAGES DE SIEGE

Le déverrouillage intempestif du siège lors d'un virage serré entraîne une fracture du rachis (4 observations connues dans l'Armée de l'Air et dans le personnel navigant des essais).

Observation (d'après rapport d'enquête) (180)

Le 2 septembre 1970, au retour d'une mission d'interception, le pilote leader de la patrouille 3^e présente en n° 1 au break à 1.500 pieds pour l'atterrissage. Au cours d'un virage relativement serré (environ 4 G) alors que le pilote est légèrement penché en avant (manoeuvre du train) le siège se déverrouille et descend brutalement au fond de l'habitacle (course de 15 centimètres environ).

Le pilote ressent alors une très violente douleur au niveau de la colonne dorsale, entraînant une dyspnée intense.

Malgré une faible visibilité, il réussit à poser l'avion normalement, regagne le parking, sort seul de la cabine de pilotage et réclame les secours médicaux.

L'examen clinique pratiqué immédiatement met en évidence une zone douloureuse se projetant en regard de D7-D8.

Les radiographies de la colonne vertébrale et les tomographies révèlent une fracture de D7 par atteinte du plateau vertébral supérieur.

Dans cette observation, le mécanisme physiopathogénique à retenir associe :

- une accélération initiale Gz + modérée (4 G) et de longue durée,
- une accélération Gz + surajoutée, de durée brève, intense, due à la descente brutale du siège au fond de l'habitacle. Elle peut atteindre plusieurs dizaines de G.

Bien que l'accélération surajoutée due à la chute du baquet ne puisse être évaluée avec précision, on doit admettre que les conditions rassemblées dans l'observation ci-dessus, sont assez proches de celles d'un impact, les conséquences étant encore aggravées du fait de la mauvaise position du pilote. Lors du choc du siège sur le plancher de la cabine, il se produit une légère flexion du rachis expliquant la survenue du tassement cunéiforme.

La localisation de ces fractures dans les quatre observations est D7 (3 fois), D8 (1 fois). Toujours de faible importance, elles intéressent uniquement le plateau vertébral supérieur.

5.3.5.3. LES TURBULENCES, violentes, en déséquilibrant un steward, une hôtesse, peuvent les projeter contre les parois de l'avion, un siège. Des fractures du rachis dorsal ou lombaire (corps ou apophyses transverses). C'est le cas d'une hôtesse, le 8 Août 1975, sur Mac Donnell Douglas).

5.3.6. ACCIDENTS DE CENTRIFUGEUSES ET D'EXPERIMENTATIONS

(rampe de siège éjectable , traineau)

R.P. DELAHAYE, R. AUFFRET

S O M M A I R E

5.3.6.1. CENTRIFUGEUSES ET COLONNE VERTEBRALE

1. Caractéristiques centrifugeuses du C.E.V. de Brétigny
2. Protocole d' essais
3. Résultats
 - Essais à 6,5 et 9 G
 - Essais à 11,5 G
 - Essais à 13,5 G

5.3.6.2. ACCIDENTS SUR LES RAMPES DE SIEGE EJECTABLE

5.3.6.3. ACCIDENTS SUR TRINEAUX PROPULSES

Au cours des expérimentations, soit à bord de centrifugeuses, soit à bord de traineaux propulsés ou de rampes d'entraînement à l'utilisation du siège éjectable sur des rampes, il a été décrit des atteintes traumatiques du rachis et plus particulièrement des fractures.

5.3.6.1. CENTRIFUGEUSES ET COLONNE VERTEBRALE

Les accidents rachidiens créés par le passage sur la centrifugeuse sont très rarement rapportés dans la littérature médicale. Pourtant, nous avons été à plusieurs reprises contactés pour donner un avis circonstancié sur des douleurs vertébrales apparues chez certaines expérimentateurs après passage sur la centrifugeuse.

Nous avons pu suivre particulièrement l'évolution rapide d'une arthrose cervicale avec manifestations cliniques et radiologiques particulièrement caractéristiques. Cette affection apparaît dans les suites immédiates d'un essai mené sur la centrifugeuse du Laboratoire de Médecine Aéronautique du Centre d'Essais en Vol de Brétigny sur Orge.

5.3.6.1.1. Caractéristiques et performances de la centrifugeuse du C.E.V. de Brétigny sur Orge (fig 100 et 101)

Cette centrifugeuse construite en 1955 est opérationnelle depuis 1956. Elle est constituée d'un bras de 6 mètres tournant autour d'un axe vertical. A l'extrémité du bras ext fixée une nacelle dans laquelle sujets humains, animaux, matériels d'équipement sont soumis à des accélérations obtenues en utilisant la force centrifuge. Dans une salle circulaire, placée au dessus du bras, sont centralisés les circuits électriques et de mesures qui ne font pas partie des organes moteurs. Des enregistreurs photographiques ou magnétiques, du type de ceux utilisés en avion dans les essais en vol, doublent ces enregistrements. De plus, la télévision et le cinéma sont employés pour la surveillance des sujets d'expérience.

Différentes nacelles orientables, interchangeableables en fonction du type d'expérimentation sont employées :

- une grande nacelle d'un diamètre de 3 m dans laquelle le support du siège peut être orienté suivant quatre directions à 90° les unes des autres ;
- une cabine d'avion Etendard II, entièrement équipée de ses commandes et instruments qui peuvent être programmées à partir d'un ordinateur analogique.
(Diverses phases de vol peuvent ainsi être simulées sous accélérations
- une nacelle à grande performance plus souvent utilisée pour des essais de matériel,
- des nacelles spéciales non carénées pour essais de matériel encombrant.

- lors de la montée brutale de l'accélération + Gz, le pilote est tassé sur son siège, colonne en hyperflexion malgré le sanglage serré.

- 1/2 seconde après, survient l'accélération de sens opposé et le pilote est alors brutalement projeté vers le haut et décollé du siège, sans avoir eu complètement le temps de se tasser complètement.

Il s'agit de fractures par compression (mécanisme I ou II de Watson-Jones). Il est certain que la position assise asymétrique (une fesse moins enfoncée que l'autre) aggrave le problème des transmissions, des accélérations. Ces fractures peuvent intéresser :

- isolément un plateau vertébral supérieur ou inférieur,
- ou les deux plateaux généralement de deux vertèbres différentes : plateau vertébral supérieur de D4 et inférieur de D6, par exemple.

Au niveau de la colonne lombaire, l'hyperflexion chasse le nucléus pulposus en arrière par un mouvement rapide qui n'a pas le temps de se modifier de sens lors du changement d'accélération. C'est pourquoi une hernie discale peut être créée et se déclencher dans les suites immédiates d'un pompage grave avec toutes les variantes cliniques possibles.

5.3.5.2. LES DEVERROUILLAGES DE SIEGE

Le déverrouillage intempestif du siège lors d'un virage serré entraîne une fracture du rachis (4 observations connues dans l' Armée de l' Air et dans le personnel navigant des essais).

Observation (d'après rapport d'enquête) (180)

Le 2 septembre 1970, au retour d'une mission d'interception, le pilote leader de la patrouille se présente en n° 1 au break à 1.500 pieds pour l'atterrissage. Au cours d'un virage relativement serré (environ 4 G) alors que le pilote est légèrement penché en avant (manoeuvre du train) le siège se déverrouille et descend brutalement au fond de l'habitacle (course de 15 centimètres environ).

Le pilote ressent alors une très violente douleur au niveau de la colonne dorsale, entraînant une dyspnée intense.

Malgré une faible visibilité, il réussit à poser l'avion normalement, regagne le parking, sort seul de la cabine de pilotage et réclame les secours médicaux.

L'examen clinique pratiqué immédiatement met en évidence une zone douloureuse se projetant en regard de D7-D8.

Les radiographies de la colonne vertébrale et les tomographies révèlent une fracture de D7 par atteinte du plateau vertébral supérieur.

Dans cette observation, le mécanisme physiopathogénique à retenir associe :

- une accélération initiale Gz + modérée (4 G) et de longue durée ,
- une accélération Gz + surajoutée, de durée brève, intense, due à la descente brutale du siège au fond de l'habitacle. Elle peut atteindre plusieurs dizaines de G.

Bien que l'accélération surajoutée due à la chute du baquet ne puisse être évaluée avec précision, on doit admettre que les conditions rassemblées dans l'observation ci-dessus, sont assez proches de celles d'un impact, les conséquences étant encore aggravées du fait de la mauvaise position du pilote. Lors du choc du siège sur le plancher de la cabine, il se produit une légère flexion du rachis expliquant la survenue du tassement cunéiforme.

La localisation de ces fractures dans les quatre observations est D7 (3 fois), D8 (1 fois). Toujours de faible importance, elles intéressent uniquement le plateau vertébral supérieur.

5.3.5.3. LES TURBULENCES, violentes, en déséquilibrant un steward, une hôtesse, peuvent les projeter contre les parois de l'avion, un siège. Des fractures du rachis dorsal ou lombaire (corps ou apophyses transverses). C'est le cas d'une hôtesse, le 8 Août 1975, sur Mac Donnell Douglas).

5.3.6. ACCIDENTS DE CENTRIFUGEUSES ET D'EXPERIMENTATIONS

(rampe de siège éjectable , traineau)

R.P. DELAHAYE, R. AUFFRET

S O M M A I R E

5.3.6.1. CENTRIFUGEUSES ET COLONNE VERTEBRALE

1. Caractéristiques centrifugeuses du C.E.V. de Brétigny
2. Protocole d' essais
3. Résultats
 - Essais à 6,5 et 9 G
 - Essais à 11,5 G
 - Essais à 13,5 G

5.3.6.2. ACCIDENTS SUR LES RAMPES DE SIEGE EJECTABLE

5.3.6.3. ACCIDENTS SUR TRAINEAUX PROPULSES

Au cours des expérimentations, soit à bord de centrifugeuses, soit à bord de traineaux propulsés ou de rampes d'entraînement à l'utilisation du siège éjectable sur des rampes, il a été décrit des atteintes traumatiques du rachis et plus particulièrement des fractures.

5.3.6.1. CENTRIFUGEUSES ET COLONNE VERTEBRALE

Les accidents rachidiens créés par le passage sur la centrifugeuse sont très rarement rapportés dans la littérature médicale. Pourtant, nous avons été à plusieurs reprises contactés pour donner un avis circonstancié sur des douleurs vertébrales apparues chez certaines expérimentateurs après passage sur la centrifugeuse.

Nous avons pu suivre particulièrement l'évolution rapide d'une arthrose cervicale avec manifestations cliniques et radiologiques particulièrement caractéristiques. Cette affection apparaît dans les suites immédiates d'un essai mené sur la centrifugeuse du Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vol de Brétigny sur Orge.

5.3.6.1.1. Caractéristiques et performances de la centrifugeuse du C.E.V. de Brétigny sur Orge (fig 100 et 101)

Cette centrifugeuse construite en 1955 est opérationnelle depuis 1956. Elle est constituée d'un bras de 6 mètres tournant autour d'un axe vertical. A l'extrémité du bras ext fixée une nacelle dans laquelle sujets humains, animaux, matériels d'équipement sont soumis à des accélérations obtenues en utilisant la force centrifuge. Dans une salle circulaire, placée au dessus du bras, sont centralisés les circuits électriques et de mesures qui ne font pas partie des organes moteurs. Des enregistreurs photographiques ou magnétiques, du type de ceux utilisés en avion dans les essais en vol, doublent ces enregistrements. De plus, la télévision et le cinéma sont employés pour la surveillance des sujets d'expérience.

Différentes nacelles orientables, interchangeable en fonction du type d'expérimentation sont employées :

- une grande nacelle d'un diamètre de 3 m dans laquelle le support du siège peut être orienté suivant quatre directions à 90° les unes des autres ;
- une cabine d'avion Etendard II, entièrement équipée de ses commandes et instruments qui peuvent être programmées à partir d'un calculateur analogique.
(Diverses phases de vol peuvent ainsi être simulées sous accélérations
- une nacelle à grande performance plus souvent utilisée pour des essais de matériel,
- des nacelles spéciales non carénées pour essais de matériel encombrant.



Figure 100 : Centrifugeuse Laboratoire de Médecine Aéronautique du Centre d'Essais en Vol de Brétigny-sur-Orge



Figure 101 : Pilote assis sur siège Martin Baker AM4 installé dans la nacelle de la Centrifugeuse du C.E.V. de Brétigny.

5.3.6.1.2. Protocole d'essais (6)

En centrifugeuse, grâce au lancement par catapulte, il est possible d'approcher le profil d'accélération de l'éjection. Avec la grande nacelle, 13,5 G seront obtenus en 1 sec. temps plus long que l'éjection réelle mais la durée 0,8 sec. du plateau à 13,5 G suivi d'un freinage en 1 sec. donne des renseignements voisins d'une éjection.

Pour que la forte accélération centripète produite par la centrifugeuse soit dirigée selon le grand axe du corps il faut que le sujet soit placé sensiblement horizontalement la tête dirigée vers l'axe de rotation. Le temps très bref de lancement ne permet pas d'utiliser une nacelle " libre " s'inclinant selon sa propre inertie et nécessité, avant le lancement, un basculement manuel de la nacelle qui amènera le grand axe du corps dans le prolongement de l'axe du bras portant la nacelle de la centrifugeuse. Cette position inconfortable rend difficile la mise en place correcte du dos, de l'expérimentateur sur le siège Martin Baker MK 4 utilisé.

La surveillance du sujet était assurée par télévision. Deux caméras 16 mm noir et blanc ont enregistré les déplacements de la tête du sujet de face et de profil.

L'accélération sur l'axe Z, l'électrocardiogramme et la rhéographie de la base du crâne ont été enregistrés à chaque essai réalisé aux amplitudes d'accélération progressive : 6,5, 9, 11,5 et 13,5 G.

5.3.6.1.3. Résultats

- Essais à 6,5 et 9 G -

Aucun trouble subjectif n'a été signalé par les expérimentateurs, ni perte de conscience, ni baisse de vision. Il faut néanmoins noter l'apparition de douleurs dorsales au niveau de D7 D8 D9, surtout après des essais répétés.

- Essais à 11,5 G -

L'accélération commence à être durement ressentie par le sujet. Ni perte de conscience, ni voile, ne sont constatés. Par contre, les douleurs vertébrales aiguës sont constantes mais elles ne durent que quelques heures.

- Essais à 13,5 G -

Un seul essai, avec un pilote d'essai âgé de 35 ans, est réalisé. Il n'y a pas de trouble visuel, pas de perte de connaissance. Le tassement du sujet, visible sur les films cinématographiques est très important. Il est de l'ordre de 15 centimètres.

Le sujet R.A. était couché au départ, le dos du sujet était mal positionné par rapport au dossier du siège. De plus, au cours de cet essai à 13,5 G on observe un léger dérapage de la nacelle qui provoque des accélérations angulaires complexes au niveau du rachis cervical. Dans les jours suivants le lancement, R.A. ressent une douleur d'abord lancinante et inconstante au niveau de C6-C7 puis constante avec des paroxysmes nocturnes et des dysesthésies dans le domaine C6-C7. La douleur est très intense, aggravée par toute mobilisation passive et active. L'examen neurologique montre l'existence d'un signe de Babinsky unilatéral signant le traumatisme médullaire(*) du membre supérieur gauche avec disparition de réflexes tricipital et stylo-radial gauche.

Très rapidement se constitue un tableau radiologique typique d'une arthrose C5-C6 et C6-C7 avec pincement global de l'interligne C6-C7, condensation des plateaux de C5-C6-C7 et une ostéophytose marginale particulièrement nette au niveau de C6-C7. Ce pilote R.A. possédait des documents radiologiques récents (moins de 3 mois) qui ont permis de suivre le développement très rapide de cette arthrose post traumatique. Les trous de conjugaison C6-C7, de petite taille, ont également présenté des modifications classiques de leur morphologie du type habituellement décrit dans l'arthrose vertébrale.

Après une immobilisation par minerve pendant 3 mois, puis le port d'un appareil en plexiglass pendant 2 mois de façon intermittente, la récupération fonctionnelle a été totale. Il n'a pas persisté de déficit neurologique.

Les syndromes douloureux vertébraux avec altérations radiologiques ont vraisemblablement pour origine la combinaison des accélérations sur les axes Z (longitudinal) et de X (transverse) au moment du lancement et de l'arrêt de la centrifugeuse. Ils s'apparentent à ce que l'on rencontre lors d'éjections compliquées avec mauvaise position du corps au départ du siège. Ces phénomènes douloureux apparaissent d'autant plus rapidement que les trous de conjugaison présentent une petite taille, et que les disques intervertébraux ont déjà été traumatisés.

(*) et révèle l'existence d'une atteinte radiculaire

5.3.6.2. ACCIDENTS SUR LES RAMPES DE SIEGES EJECTABLES

Ces accidents sur des rampes d'essais ou d'entraînement de siège éjectable sont rarement observés. Ils sont dus, le plus souvent, à un mauvais fonctionnement du siège ou à des modifications du siège.

L'accélération enregistrée sur les rampes est bien plus faible que dans une éjection vraie. E.H. Cooper, F.M.G. Holmstrom (USAF)(42) rapportent les résultats de 200 essais réalisés en 1960 sur une rampe donnant 9 G avec une installation de 100 G par seconde. Ces auteurs observent 4 fractures du coccyx. Ils constatent que du fait de l'utilisation d'un coussin de siège très mou, apparaît une augmentation importante de l'amplitude G (13,5 G) et du taux d'installation (500 G/seconde dans un cas). Dans d'autres cas, le rôle de la position assise du pilote sur le siège éjectable doit être discuté ainsi que le fonctionnement du système de mise à feu du siège.

Cet entraînement a été abandonné dans l' Armée de l' Air française depuis plus de 20 ans. Il n'avait pas été observé de fractures vertébrales parmi le personnel ayant utilisé ces rampes d'essai.

5.3.6.3. ACCIDENTS SUR TRAINEAUX PROPULSES

Ils sont très rares car les protocoles expérimentaux nécessitent une vérification soigneuse du harnachement de l'expérimentateur. Tant que le sanglage est correctement appliqué et que les conditions de ralentissement du traineau propulsé ne créent pas des amplitudes d'accélération en Gz + trop élevées, il n'a pas été observé de fracture du rachis. Mais si ces conditions ne sont pas respectées , l'hyperflexion créée par l'accélération Gz + donne des fractures de la colonne dorso-lombaire. Nous avons pris connaissance de plusieurs dossiers cliniques et radiologiques de blessés au cours de ces essais, provenant des centres étrangers de médecine aéronautique qu'on nous a communiqués pour étude et avis à donner en vue d'une indemnisation.

5.4. EXAMEN CLINIQUE DES TRAUMATISES DU RACHIS

P. DOURY et G. LEGUAY

S O M M A I R E

5.4.1. EXAMEN CLINIQUE DU RACHIS

- 5.4.1.1. Examen du sujet debout de face
- 5.4.1.2. Examen du sujet debout de dos
- 5.4.1.3. Examen du sujet debout de profil
- 5.4.1.4. Marche sur talon sur pointe des pieds
- 5.4.1.5. Examen du sujet assis
- 5.4.1.6. Examen du sujet en décubitus dorsal
- 5.4.1.7. Examen du sujet en décubitus ventral

5.4.2. EXAMEN CLINIQUE DES TRAUMATISES DU RACHIS

- 5.4.2.1. Fractures avec manifestations cliniques
 1. Fractures dorso-lombaires
 2. Fractures cervicales
- 5.4.2.2. Fractures sans manifestation clinique

5.4.1. EXAMEN CLINIQUE DU RACHIS

L'examen clinique du rachis succède à l'interrogatoire et précède toujours l'examen radiologique. L'examen comprendra des manoeuvres sur un sujet debout, assis ou couché. Bien sûr, en cas de traumatisme important, cet examen clinique sera toujours prudent, la plupart du temps sur un blessé en décubitus dorsal.

5.4.1.1. L'examen du sujet debout de face

Vérifié l'équilibre du bassin, l'horizontalité de la ligne passant par les épines iliaques antéro-supérieures et les crêtes iliaques, l'horizontalité des épaules et la symétrie du thorax.

5.4.1.2. L'examen du sujet debout de dos

Le sujet examiné est debout pieds joints. Le médecin est assis derrière lui et maintient les genoux du sujet examiné entre les siens. Le médecin vérifie :

- l'équilibre du bassin,
- l'horizontalité de la ligne passant par les épines iliaques postéro-supérieures.
- la symétrie des plis fessiers qui doivent être au même niveau, le sillon interfessier doit être vertical.
- la verticalité de la ligne des épineuses qui doit être rectiligne.

La flexion antérieure du rachis, les membres inférieurs étant maintenus en extension, permet d'apprécier la distance main-sol et par conséquent, la souplesse du rachis lombaire. Pour cette recherche, il faudra vérifier l'intégrité des articulations coxo-fémorales qui participent évidemment à ce mouvement.

La flexion antérieure permet également de vérifier l'absence de toute gibbosité par rotation des corps vertébraux. L'examineur, placé derrière le sujet, examine le rachis et les masses musculaires paravertébrales, à jour frisant. Les masses musculaires doivent, lors de la flexion, se projeter sur une ligne horizontale. L'indice de SCHÖBER se calcule en mesurant, lors de la flexion en avant, l'accroissement de la distance séparant deux traits horizontaux :

- l'un étant au niveau de L5 S1
- l'autre situé 10 centimètres au dessus du premier, lorsque le sujet se trouve en rectitude.

Normalement, cet accroissement est de 5 centimètres.

Les flexions latérales droite et gauche doivent montrer une courbure harmonieuse du rachis, sans segment rigide et sans angulation. Elles ne doivent pas être douloureuses.

L'extension ou rétro-flexion du rachis doit être indolore

Tous ces mouvements sont exécutés par le patient, tandis que l'examineur les accompagne. En flexion latérale, une main de l'examineur fixe le bassin, tandis que l'autre accompagne le mouvement de latéro-flexion exécuté par le sujet.

5.4.1.3. L'examen du sujet debout de profil

montre l'absence d'hypercyphose dorsale, d'hyperlordose lombaire et d'hypotonie de la sangle abdominale. On mesure la distance occiput-mur qui doit être nulle

5.4.1.4. La marche sur les talons

explorant la motricité des muscles de la dorsiflexion du pied innervés par L5 et la marche sur la pointe des pieds explorant la motricité des muscles du triceps sural innervés par la racine S1 termine l'examen du sujet debout.

5.4.1.5. L'examen du sujet assis étudie la rotation axiale du tronc. Le sujet assis, face à l'examineur qui maintient les genoux de celui-ci, serrés entre les siens afin de fixer le bassin. On fait exécuter un mouvement de rotation du tronc en prenant le sujet par les épaules. Ce mouvement qui doit être indolore, sollicite la charnière dorso-lombaire.

5.4.1.6. L'examen du sujet en décubitus dorsal vérifie l'égalité de longueur en mesurant la distance épine iliaque antéro-supérieure-malléole interne, puis la distance ombilic -malléole interne, puis la distance grand trochanter-malléole externe.

La manoeuvre de LASEGUE consiste à fléchir la cuisse sur le bassin en maintenant en extension la jambe sur la cuisse. Normalement, cette manoeuvre ne déclenche aucune douleur dans la région lombaire et dans les membres inférieurs.

Les manoeuvres d'écartement et de rapprochement des ailes iliaques ne doivent pas déclencher des douleurs au niveau des sacro-iliaques.

5.4.1.7. L'examen du sujet en décubitus ventral comporte la palpation des épines vertébrales, la recherche d'une fossette au niveau d'une épineuse qui traduirait l'existence d'un spondylolisthésis.

La palpation des gouttières paravertébrales à un travers de doigt de la ligne des apophyses épineuses doit être indolore.

L'examen du rachis normal doit évidemment être complété notamment par l'examen neurologique, une exploration gynécologique, un examen abdominal et des fosses lombaires.

5.4.2. EXAMEN CLINIQUE DES TRAUMATISES DU RACHIS

Il faut insister d'emblée sur une notion fondamentale : quelle que soit la localisation de la fracture, il existe des fractures de la colonne vertébrale avec manifestations cliniques et des fractures asymptomatiques. Cette distinction aujourd'hui classique, justifie la pratique systématique des radiographies après tout traumatisme dû à la pratique aéronautique.

5.4.2.1. Fractures avec manifestations cliniques

1. Fractures dorso-lombaires

La douleur est la manifestation essentielle des fractures simples du rachis. Elle revêt plusieurs aspects :

- Après l'état de choc transitoire, plus ou moins accusé en rapport avec la violence du traumatisme, plus qu'avec la lésion, la douleur parfois violente apparaît immédiatement après le traumatisme. Elle entraîne alors une gêne fonctionnelle importante.

- Dans certains cas, discrètes au début, les algies augmentent d'intensité quelques heures après le traumatisme.

- Parfois la douleur est tellement passagère qu'elle ne retient pas l'attention et le blessé vaque à toutes ses occupations. Plusieurs pilotes, après éjection de nuit, doivent marcher plusieurs kilomètres pour rejoindre une gendarmerie. Ils étaient porteurs de fractures du rachis dorso-lombaire.

L'examen souvent pauvre révèle peu d'éléments positifs.

L'inspection montre parfois la présence d'ecchymoses, de plaies dues à des chocs directs.

La palpation et la percussion mettent en évidence une douleur localisée à une apophyse épineuse dorsale inférieure ou lombaire, s'accompagnant ou non de contracture des masses sacro-lombaires.

La douleur, quand elle est au moins d'intensité moyenne, est réveillée à la fois par la toux et les efforts.

Parfois un écartement anormal entre deux apophyses épineuses ou une saillie en marche d'escalier de l'une d'entre elles, apparaît.

L'examen du système nerveux est très important.

Le blessé attire l'attention sur l'impossibilité de mobiliser ses membres inférieurs, sur la perte de leur sensibilité. Cette paralysie est en général immédiate mais survient parfois secondairement à l'occasion du transport ou sur la table de radio-diagnostic.

L'examen montre une paralysie motrice des pieds et des jambes. Il s'agit d'une paralysie flasque avec abolition des réflexes rotuliens (P. Lance et R. Weber) (353). Une paralysie des muscles de la cuisse est parfois difficile à affirmer quand coexiste une fracture diaphysaire du fémur. La sensibilité à tous les modes est soigneusement explorée en notant le niveau supérieur de leur abolition.

Plus rarement, on observe un syndrome de la queue de cheval.

2. Fractures cervicales

J. Benassy (260) insiste sur la gamme des lésions d'une variété déconcertante.

L'attention peut être initialement attirée par :

- l'existence de douleurs cervicales, d'une attitude anormale de la tête et du cou à type de torticolis

- une difficulté à la mobilisation spontanée du cou qu'on étudiera avec la plus grande prudence. Il faudra tenir compte des lésions faciales associées.

- la présence de symptômes radiculaires : picotements, fourmillements dans un territoire précis uni ou bilatéral.

L'examen clinique montre des ecchymoses, des plaies dues à un choc direct. Une saillie excessive des épines cervicales ou une exagération de la fossette sous occipitale sont parfois mise en évidence.

L'examen neurologique recherchera pour débiter les troubles de la sensibilité objective. Leur constatation pour J. Benassy (260) a la même valeur que la description par le patient des douleurs qu'il a ressenties. Il faut donc préciser la topographie de chacune de ces douleurs :

C1 a un territoire limité, sans intérêt

C2 (grand herf occipital d' Arnold) d'un territoire allant de la partie haute de la nuque à la totalité de la partie chevelue du crâne

C3 zone antérolatérale du cou

C4 la base du cou et la partie haute du thorax.

Les cinq paires suivantes n'ont pratiquement pas de correspondance sur le tronc et n'ont de territoire sensitif qu'au niveau du membre supérieur :

C6 a pour territoire essentiellement le pouce et la collatérale externe de l'index

C7 les quatre collatérales suivantes (segment médian de la main)

C8, les trois collatérales internes et l'éminence hypothénar

D1 a pour territoire la partie interne du bras et la région axillaire.

Des monoplégies, des diplégies, des tétraplégies, un syndrome de BROWN-SEQUARD peuvent être individualisées. Ils sont relativement rares dans les traumatismes aéronautiques.

Il faudra retenir l'absence de parallélisme entre la clinique et la radiologie. Une tétraplégie peut apparaître sans lésion osseuse. Une fracture luxation ne se traduit parfois que par un léger torticolis.

5.4.2.2. Fractures asymptomatiques :

Dans les fractures simples du rachis, la latence clinique s'observe dans 15 à 20% des cas. L'examen le plus approfondi ne peut, dans aucun cas, fournir des arguments suffisants pour éliminer avec sûreté une fracture de la colonne vertébrale.

5.5. RADIOLOGIE DES TRAUMATISMES DU RACHIS EN MEDECINE
AERONAUTIQUE

R.P. DELAHAYE & P.J. METGES

S O M M A I R E

INTRODUCTION

5.5.1. TECHNIQUE RADIOLOGIQUE

5.5.1.1. Les radiographies de dépistage

5.5.1.2. Les examens radiologiques complémentaires

1. Les clichés localisés et les incidences obliques
2. Les tomographies
3. Etude dynamique
4. L'exploration par moyen de contraste gazeux et opaque
5. La scannographie

5.5.2. SEMEIOLOGIE RADIOLOGIQUE DES FRACTURES DU RACHIS

5.5.2.1. L'instabilité vertébrale

1. Les éléments de la stabilité vertébrale
2. Les théories de l'instabilité rachidienne
3. Les facteurs d'instabilité
 - Le mur de résistance -
4. Signes d'instabilité radiologique
5. Diagnostic différentiel des signes d'instabilité

5.5.2.2. Séméiologie radiologique des lésions osseuses et ligamentaires élémentaires

(voir sommaire particulier)

1. Le corps vertébral
2. L'arc postérieur
3. L'appareil ligamentaire

5.5.3. CLASSIFICATION DES FRACTURES DU RACHIS

5.5.4. ETUDE RADIOLOGIQUE DES FRACTURES DU RACHIS DORSO-LOMBAIRE

5.5.4.1. Les fractures stables

5.5.4.2. Les fractures instables

5.5.5. ETUDE RADIOLOGIQUE DES FRACTURES DU RACHIS CERVICAL (C3 - C7)

5.5.5.1. Rappel des notions importantes : l'instabilité fréquente

5.5.5.2. Luxations

5.5.5.3. Entorses et traumatismes mineurs

5.5.5.4. Fractures

5.5.5.5. Fractures luxations

5.5.5.6. Localisations particulières

5.5.6. ETUDE RADIOLOGIQUE DES FRACTURES de C1 et C2

5.5.6.1. Fractures de l'axis

5.5.6.2. Fractures de l'atlas

5.5.6.3. Luxations

5.5.6.4. Subluxations

5.5.6.5. Entorses et traumatismes mineurs.

INTRODUCTION

L'importance de l'examen radiologique dans le diagnostic des lésions traumatiques du rachis du personnel navigant et des parachutistes est actuellement reconnue et admise. Cette exploration est obligatoire et immédiate dans de nombreuses Armées de l'Air après accident aérien, éjection, Elle doit intéresser l'ensemble du rachis.

Les fractures, dans la majorité des cas, sont dorso-lombaires, cervicales plus rarement. Le risque immédiat ou précoce est neurologique (médullaire, surtout, radiculaire) dans les fractures instables. Les séquelles douloureuses (voir chapitre 5-6) apparaissent dès que les déformations post-traumatiques dépassent les limites de tolérance de l'individu.

5.5.1. LA TECHNIQUE RADIOLOGIQUE (262)(266)(283)(293)

La radiologie révèle les formes latentes, précise le siège des atteintes, le nombre, le type de lésions. Elle apporte des arguments à l'orientation de la thérapeutique.

L'examen radiologique du rachis en médecine aérospatiale ne diffère pas de celui de tout traumatisme vertébral récent. Il répond aux mêmes principes.

- L'examen radiologique doit être pratiqué aussi rapidement que possible après l'accident aérien.

- L'ensemble du rachis sera radiographié par des clichés segmentaires en incidence de face, de profil (52)(270).

- Les fractures à double étage au niveau de la colonne vertébrale apparaissent dans 10 à 15% des cas et nous avons l'impression qu'elles ont tendance, ces dernières années à augmenter.

- Les clichés doivent être aussi parfaits que possible

- L'examen de dépistage post traumatique est conduit en décubitus sans mobilisation du patient (profil rayon horizontal). On ne peut présumer l'importance des dégâts d'un traumatisme avant l'examen des clichés radiographiques. Une mobilisation intensive est susceptible de provoquer une complication neurologique par déplacement d'un foyer instable.

- En fonction des résultats des radiographies standards segmentaires, le radiologue sera amené éventuellement à pratiquer des examens complémentaires qui font appel aux incidences localisées, aux coupes tomographiques de face et de profil permettant une analyse plus fine des lésions observées (286)(287)(288)(293)(294)(371).

- La responsabilité du radiologue est engagée lors :

- . de la technique de prise des clichés,
- . de son interprétation
- . des conditions de retour du blessé aux urgences et dans le service d'orthopédie.

Ces principes admis, l'examen radiologique comprend des radiographies de dépistage, des examens radiologiques complémentaires (incidences obliques, localisées, tomographies, clichés dynamiques, les examens à contraste opaque, la scannographie).

5.5.1.1. Les radiographies de dépistage

Les clichés de dépistage pratiqués sur de grands formats (36 x 43) effectués en incidence de face et de profil, segment après segment, intéressent toute la colonne vertébrale. Le malade n'est pas mobilisé, il reste en décubitus (profil à rayon horizontal) jusqu'à ce que le radiologue ait examiné tous les clichés ainsi réalisés à la recherche des lésions et de leur caractère fondamental de stabilité ou d'instabilité. Il est nécessaire de réaliser des clichés supplémentaires sur les zones charnières cervico-occipitales, dorsales hautes, lombo-sacrées, mais également dorso-lombaires. Cette dernière incidence explore sans déformation des vertèbres qui sont le plus souvent le siège des lésions traumatiques.

5.5.1.2. Les examens radiologiques complémentaires

Selon les circonstances, certaines explorations sont pratiquées, immédiatement après les clichés de dépistage, d'autres à distance.

1. Les clichés localisés et incidences obliques

centrés sur la région atteinte, autorisent une étude précise des lésions vertébrales et discales. Ces incidences obliques sont réservées à l'étude des trous de conjugaison, des articulaires, des isthmes, des lames. Des tomographies dans ces mêmes incidences donnent des informations radiologiques sur l'état de ces formations anatomiques.

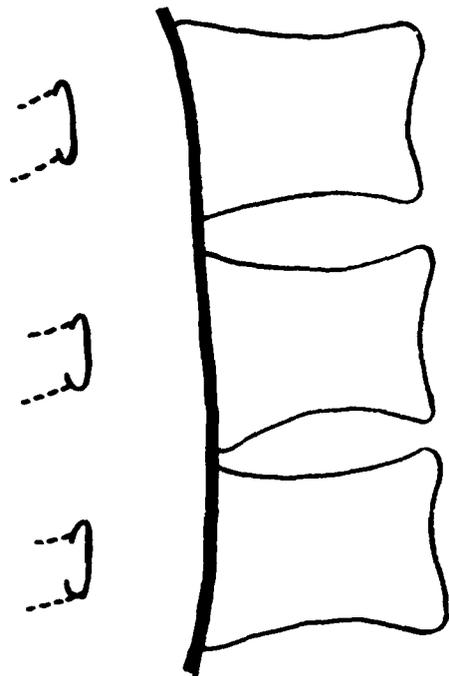


Figure 102 : Le mur postérieur doit être vérifié par une analyse des parties postérieures qui forment une ligne continue et régulière.

d'après R.P. DELAHAYE et Coll. (294)

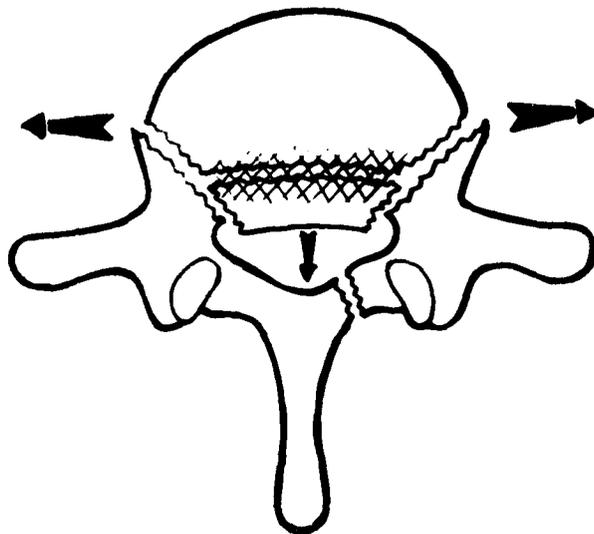


Figure 103 : La fracture intéresse le mur de résistance vertébrale et entraîne un écartement des pédicules

d'après R.P. DELAHAYE et Coll. (294)

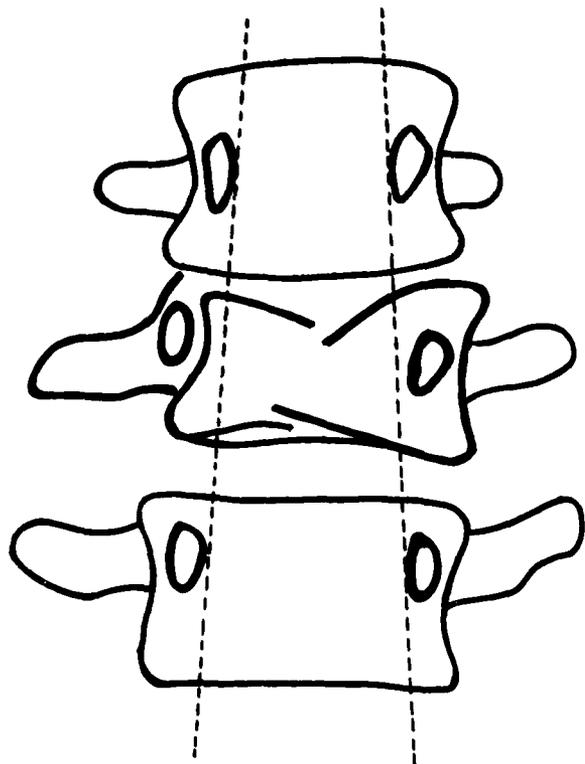
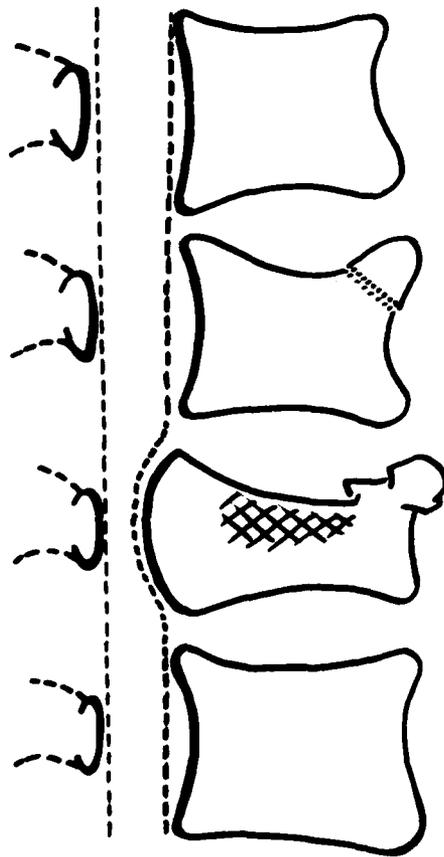


Figure 104 : Recherche de la distance inter-pédiculaire : quand elle est augmentée, on peut craindre l'existence d'une fracture instable.

(d'après R.P. DELAHAYE et Coll. (294))

Figure 105 : Atteinte du mur de résistance vertébrale (bombement)
d'après R.P.DELAHAYE et Coll.(294)



2. Les tomographies

sous les incidences classiques de face et de profil sont systématiquement pratiquées dans les services de radiologie des Hôpitaux Bégin et Dominique Larrey, en cas de découverte de fracture du rachis. Elles donnent des images dont la qualité favorise une analyse minutieuse des lésions observées (286) (287) (288) (293) (294) (371).

3. L'étude dynamique

peut être entreprise que s'il n'existe aucun signe radiologique évocateur de fracture instable. Elle explore la mobilité du rachis. Celle-ci est souvent bien diminuée par la contracture musculaire au moment du traumatisme, il faut savoir refaire l'examen lorsque cette contracture a diminué.

Les clichés radiodynamiques jouent un rôle important surtout au niveau du rachis cervical. Dans le diagnostic des entorses, ils permettent d'affirmer l'intégrité ou l'atteinte du ligament interépineux (élargissement de l'espace entre les apophyses épineuses) du disque (pincement discal, baillement électif). Ces clichés sont également intéressants dans l'étude des séquelles de fractures du rachis cervical et lombaire pour apprécier leur retentissement fonctionnel sur la statique rachidienne.

4. L'exploration par les moyens de contraste gazeux et opaque

(Amipaque) est indiquée en cas de sténose canalaire séquellaire, de hernie discale post-traumatique (362). L'angiographie spinale, en cas de lésions neurologiques, a été employée par DJINDJIAN et son Ecole (269).

5. La scannographie

fournit des coupes horizontales des vertèbres qui exposent parfaitement bien l'arc postérieur et la moëlle épinière. Cet examen facilite la compréhension des lésions complexes de l'arc postérieur, visualise les hématomes pré-fracturaires sur les lésions fraîches et les sténoses canalaire immédiates et séquellaires (347)(361).

5.5.2. LA SEMEIOLOGIE RADIOLOGIQUE DES FRACTURES DU RACHIS

Les fractures et luxations du rachis sont dominées par le drame d'une lésion médullaire complète contemporaine de la fracture, par la hantise d'une complication neurologique secondaire. Ce sont les lésions traumatiques instables qui à quelques nuances près peuvent être responsables de l'atteinte nerveuse. On dit que la cohésion vertébrale ou stabilité qui donne au rachis sa solidité et limite sa mobilité est rompue. Dans ces conditions, tout déplacement vertébral au cours de la mobilisation ou lors du traumatisme, qui dépasse les limites physiologiques, aggrave les déformations vertébrales et lèse les formations nerveuses. Le rôle du radiologue, par les investigations radiocliniques, est d'abord de dépister une instabilité vertébrale et de faire une analyse aussi complète que possible des lésions osseuses, ligamentaires et de leur retentissement sur la statique et sur le canal rachidien.

Nous étudierons pour débiter l'instabilité vertébrale et ensuite nous détaillerons la séméiologie de toutes les lésions osseuses et ligamentaires.

5.5.2.1. L'instabilité vertébrale (261)(279)(336)(337)(386)(448)

On appelle instabilité d'un foyer de fracture ou luxation rachidienne une mobilité pathologique latente qui peut aller au delà des limites physiologiques. Elle trouve sa cause dans des lésions osseuses (instabilité provisoire après constitution d'un cal osseux) ou disco ligamentaire (instabilité durable par insuffisance de cal fibreux).

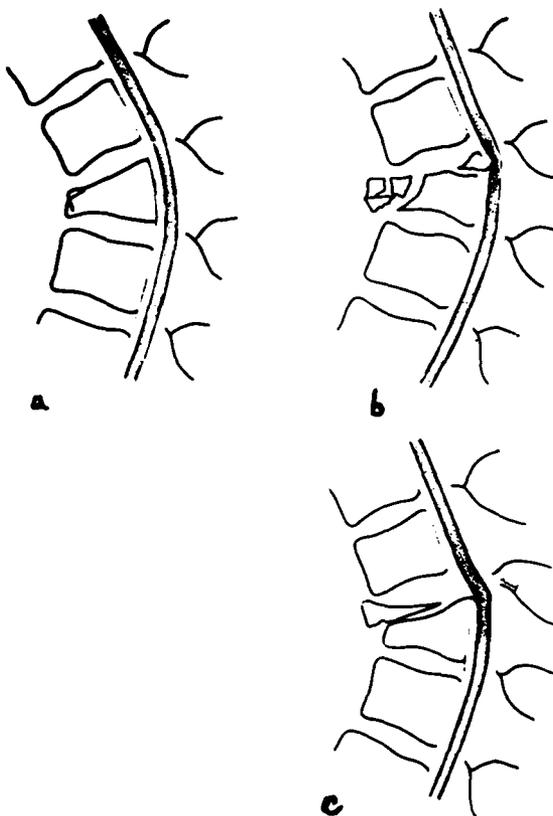
1. Les éléments de la stabilité vertébrale

- La stabilité verticale est assurée par une colonne antérieure disco-corporéale et par 2 colonnes apophyso-articulaires en arrière. Il est à signaler que ces 3 colonnes fusionnent sur l'axis. De l'atlas à l'occipital, il ne reste plus que 2 colonnes latérales.

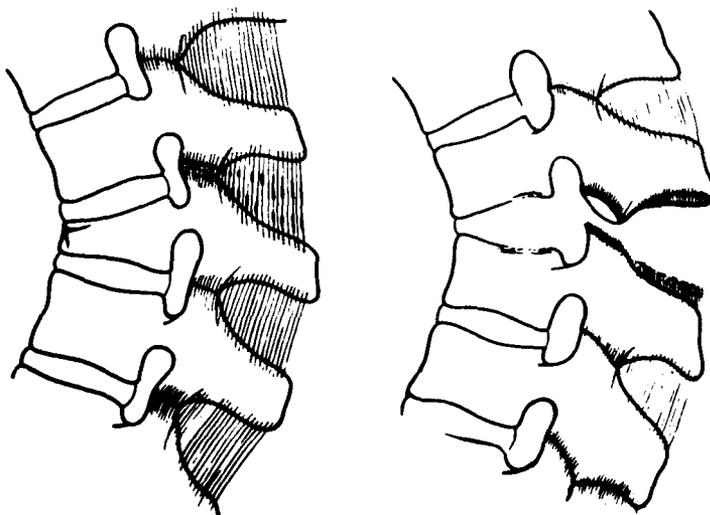
- La stabilité horizontale au niveau des segments mobiles est sous la dépendance de butées osseuses (odontoïde, apophyses unciformes, apophyses articulaires, épineuses et transverses) et de freins disco-ligamentaires. On comprend qu'une instabilité puisse être uniquement disco-ligamentaire, comme certaines luxations et entorses graves cervicales, ce qui pose des problèmes difficiles de diagnostic. Ces éléments anatomiques sont radiotransparents.

2. Les théories de l'instabilité rachidienne

sont diverses. Pour Nicoll (386), Holdsworth (336)(337) l'instabilité est en rapport avec la rupture du complexe ligamentaire postérieur, en particulier interépineux. Pour Rieunau et Decoux (279), elle est due à la rupture du mur postérieur disco-corporéal. Pour Roy Camille (261)(411) c'est une lésion du segment vertébral moyen qui est responsable de l'instabilité (mur postérieur, avec attaches ligamentaires, pédicules, apophyses articulaires).



- Classification anatomopathologique d'après DECOULX et RIEUNAU modifiée (279)
- a) Fracture cunéiforme antérieure avec intégrité du mur postérieur ;
 - b) Fracture complexe avec lésion du mur de résistance et rupture du mur postérieur ;
 - c) Fracture luxation avec rupture du mur postérieur et intégrité du mur de résistance.



- Figure 107 : Entorse et arrachement des ligaments interépineux et apophysaires dans les traumatismes de la colonne vertébrale - d'après WATSON-JONES (448)
- a) dans une fracture stable, le ligament interépineux est généralement respecté ;
 - b) dans une fracture instable, le ligament interépineux est souvent arraché.

3. Les facteurs d'instabilité

sont multiples. Ils comprennent :

- l'aspect comminatif de la fracture corporéale qui allonge le temps de consolidation
- le pincement du ou des disques intervertébraux
- la rupture du ligament interépineux (fig 107)
- la rupture du mur postérieur (Decoux et Rieunau) (279) (fig 106)

C'est une notion anatomique représentée par l'alignement sur une ligne verticale harmonieuse des forces postérieures des disques intervertébraux et des corps vertébraux revêtus de leur surtout ligamentaire. Sur une radiographie, c'est la ligne qui passe par le bord postérieur des corps vertébraux sur l'incidence de profil (fig. 102).

Le mur de résistance (294)

L'architecture du corps vertébral comporte trois systèmes de travées de renforcement horizontal, vertical et oblique (fig 5 et 6). Ainsi la partie antérieure et médiane constitue une zone de moindre résistance prédisposée aux tassements cunéiformes antérieurs. Au contraire, le croisement très serré des faisceaux au niveau des insertions pédiculaires (figure 5) augmente la solidité de cette partie postérieure du corps vertébral qui joue le rôle d'un " mur de résistance " pour les formations nerveuses du canal rachidien. Le mur de résistance (figure 6) comprend les insertions pédiculaires et la zone intermédiaire soit la face postérieure du corps vertébral sur une certaine épaisseur. Une lésion du mur de résistance peut s'accompagner d'une rupture du mur postérieur (fig. 105) avec écartement des pédicules, la fracture est instable. Mais elle peut être isolée, la fracture est stable. Néanmoins des lésions nerveuses peuvent survenir immédiatement ou dans les séquelles par retentissement sur le canal rachidien et son contenu. Ainsi la fracture par éclatement ou explosion du corps vertébral cervical est un exemple de fracture stable (intégrité des ligaments longitudinal antérieur et inter épineux) pourtant la rupture du mur de résistance est responsable par recul d'un fragment postérieur d'une éventuelle lésion neurologique. Ainsi, sur la radiographie de face, l'écartement d'un ou des 2 pédicules (fig 103 et 104) de l'alignement des différentes pédicules vertébraux traduit une fracture instable antérieure et postérieure et une lésion du mur de résistance. Sur l'incidence de profil, on analyse l'alignement des bords postérieurs disco-ligamentaires à la recherche d'une rupture disco corporéale (rupture du mur postérieur associé ou non à une rupture du mur de résistance - bombement éventuellement isolé de tout ou partie de la face postérieure du corps vertébral dans le canal rachidien (fig 105).

4. Signes d'instabilité radiologique

Il faut séparer le rachis en 2 régions; dorsolombaire et cervicale.

Le rachis dorso-lombaire : sur les incidences segmentaires de face, le radiologue recherche plusieurs signes :

. L'écartement de 1 ou des 2 pédicules d'une vertèbre par rapport à l'alignement des pédicules des vertèbres sus et sous jacentes. C'est une rupture de l'anneau rachidien. Il existe un distasis uni ou bilatéral des articulaires postérieures. On recherche une fracture des lames (261).

- . Le décalage d'une épineuse par rapport à la ligne des épineuses.
- . L'augmentation de la distance entre deux épineuses par rapport aux étages sus et sous jaccents (lésion du ligament inter épineux).
- . La fracture des lames au dessous de L4

Sur l'incidence de profil, il faut noter la présence de une ou plusieurs images significatives :

- . La rupture du mur postérieur (279)(336)(337)(386)(448)
- . les fractures pédiculaires et des apophyses articulaires postérieures.
- . les fractures comminutives du corps vertébral
- . la divergence des épineuses.

Le rachis cervical : les mêmes signes d'instabilité du rachis dorso-lombaire sont retrouvés au niveau du rachis cervical. Mais là, l'instabilité peut être d'origine disco ligamentaire avec très peu de lésions osseuses (luxation, subluxation, entorse grave).

Ces signes de certitude d'instabilité se recherchent sur les incidences de face et de profil.

De face : il apparait une augmentation anormale de la distance entre 2 épineuses (luxation) alors qu'au rachis cervical, cette valeur est à peu près égale.

Une déviation importante de la ligne des épineuses en cas de luxation unilatérale.

De profil : il est possible de mettre en évidence :

- . le dédoublement des articulaires à un niveau alors qu'elles sont superposées au dessous. S'il y a une rotation, il faut rechercher une fracture articulaire.
- . l'antélisthésis ou le rétrolisthésis d'un corps vertébral de plus de 3,5 mm au dessus de C4 et de plus de 2 mm au dessous de C4.
- . la découverte d'une surface articulaire de plus de 50% ou le baillement postérieur de l'interligne articulaire.
- . l'angulation d'un corps vertébral par rapport au corps vertébral sous jacent de plus de 11°.
- . le baillement d'un espace interépineux supérieur à l'écartement des espaces sus et sous jacents.

Dans certains cas, les incidences de face et de profil neutre ne révèlent pas l'existence de signes radiologiques d'instabilité. Ces derniers n'apparaissent que lors des épreuves radiodynamiques réalisées dans ces cas particuliers avec la plus grande prudence.

5. Diagnostic différentiel radiologique des signes d'instabilité

Dans certains cas particuliers il se pose avec :

- . une inversion de la courbure physiologique du rachis cervical
- . un trouble de la statique (dos plat ou creux)
- . une néocharnière acquise au-dessus d'un bloc vertébral congénital, acquis ou fonctionnel (arthrose)
- . une lésion discoligamentaire instable. Dans ce cas, l'angulation de la courbure cervicale de profil disparaît en hyperextension et s'aggrave en hyperflexion.

Il faut éviter certains pièges liés à l'anatomie fonctionnelle, aux superpositions, aux défauts d'incidences. Il est absolument nécessaire d'exiger des radiographies strictement de face appréciant les déviations de la ligne des épineuses et strictement de profil pour éviter la superposition des articulations.

En cas de doute, pour éviter toute interprétation erronée, les incidences sont refaites et complétées par des incidences obliques, des tomographies de face et de profil.

5.5.2.2. Séméiologie radiologique des lésions osseuses et ligamentaires

La lecture du sommaire particulier montre que ces lésions osseuses et ligamentaires intéressent selon des associations plus ou moins complexes ou de façon isolée le corps vertébral, l'arc postérieur, l'appareil ligamentaire (40)(45)(51)(52)(166)(274)(339)(374).

1. LE CORPS VERTEBRAL
 - a) Tassement cunéiforme antérieur
 - b) Fractures comminutives
 - c) Fractures-luxations
2. ARC POSTERIEUR
3. APPAREIL LIGAMENTAIRE

1. Le corps vertébral

Plusieurs types de fractures existent. Le tassement cunéiforme le plus fréquent avec tous ses degrés, les fractures comminutives, la fracture-luxation avec ou non des atteintes associées de l'arc postérieur, des disques ou à distance (293)(397)(398)(448).

Nous les décrivons en suivant un plan identique :

- la forme du corps,
- l'aspect des contours des plateaux et des angles,
- la densité et la structure de la plage osseuse
- les atteintes de l'arc postérieur,



Figure 108 : Fracture de D 11 caractérisée par un tassement cunéiforme(éjection).



Figure 109 : Fracture de D 10 éjection(coin antérieur qui bave).



Figure 110 : Tassement de L5 localisé au plateau vertébral supérieur (accident d'hélicoptère)



Figure 111 : Môme pilote que fig. 110, arrachement du coin antérieur de L5



Figure 112 : Fracture de D8 D9 (parachutisme) avec aspect condensé (Gérard-Marchant)



Figure 113 : Accident de pompage - Fracture de D7 D8
D7 atteinte du plateau vertébral inférieur
D8 atteinte du plateau vertébral supérieur

- les déplacements et les troubles statiques,
- les lésions associées (disque, appareil ligamentaire et parties molles)
- les lésions à distance.

a) Tassement cunéiforme antérieur

. Forme du corps

Les tassements cunéiformes sont les plus fréquents, les tassements latéraux plus rares.

Le tassement cunéiforme antérieur se traduit par une diminution de hauteur du corps vertébral localisée à sa partie antérieure (fig 108).

Une ou plusieurs vertèbres sont atteintes. Souvent, le même aspect de tassement cunéiforme antérieur se retrouve au niveau de toutes les vertèbres fracturées. Le cliché de profil, le plus instructif, précise le degré de tassement. Dans la plupart des cas, le tassement est peu important mais parfois le corps vertébral est réduit au 1/4 ou au 1/3 de sa hauteur. Les radiographies de face révèlent parfois un élargissement du corps vertébral.

Le tassement latéral, plus rarement isolé, s'observe dans la plupart des cas associé avec un tassement cunéiforme antérieur. Sur le cliché de face, le corps vertébral présente une asymétrie de hauteur dans le plan frontal.

. Aspect des angles et des contours des plateaux

Les contours antérieurs sont souvent irréguliers : dans les fractures tassements, l'angle antérieur déborde le contour vertébral. On dit qu'il " bave " (fig 109). Le trait de fracture est rarement visible, ce qui a permis à Watson-Jones (448) de parler de fractures enclavées par tassement. Dans de nombreux cas, il existe un arrachement du coin antéro-supérieur, le trait de fracture alors visible est irrégulier ou engrené. Le bord antérieur du corps vertébral est déformé en angle obtus. Les fractures-tassements s'accompagnent d'une éfraction de la partie antérieure des plateaux. Dans 75% des cas, le plateau supérieur est seul atteint. Dans les traumatismes violents, il n'est pas rare de noter l'atteinte associée des 2 plateaux vertébraux. L'atteinte isolée d'un plateau vertébral inférieur s'observe dans des traumatismes très particuliers : hyperflexion avec tête en bas ou accidents vibratoires aigus du type pompier (fig 113). Le plus souvent, la fracture isolée du plateau vertébral inférieur s'observe dans les fractures pathologiques (métastases par ex) en dehors de tout traumatisme important.

. Densité et structure de la plage osseuse

Dans les fractures examinées peu de temps après le traumatisme, les modifications de la densité ou de la structure de la plage osseuse ne sont pas toujours importantes.

Dans certains cas, il est possible d'observer un aspect plus ou moins condensé sur une vertèbre présentant un discret tassement cunéiforme antérieur. Cette condensation est toujours localisée à la région fracturée. Quand la vertèbre de morphologie normale présente une condensation qui peut être centrale et très localisée, il s'agit de l'aspect décrit par Gérard Marchant (283) sous l'expression de fracture latente du 1er degré (fig 112). Cette forme très particulière dans ce cas évolue très rapidement vers la guérison (le plus souvent sans contention plâtrée). La condensation disparaît habituellement au bout de 3,4 mois.

. Atteintes de l'arc postérieur

Le mur postérieur est intact mais des lésions associées à l'arc postérieur s'observent parfois. Elles intéressent le plus souvent les apophyses transverses.

. Déplacements et troubles statiques

Dans les tassements simples respectant le mur postérieur il n'existe ni déplacement vertébral, ni troubles statiques dans les suites immédiates ou éloignées. Dans les tassements marqués, le retentissement très important sur la statique peut conduire à l'intervention pour prévenir les douleurs séquellaires.

. Lésions associées

Dans les tassements cunéiformes antérieurs, les disques sont généralement respectés. Mais dans certains cas, le nucleus pulposus peut effondrer le plateau vertébral sur lequel il s'appuie et l'on voit apparaître une encoche du plateau à bords relativement nets (fig 114).

Les lésions du disque peuvent correspondre à un important pincement. C'est le plus souvent le disque sus jacent à la vertèbre fracturée qui est atteint. Ces lésions coïncident parfois avec une simple rupture du plateau vertébral. Le plateau forme alors une ligne brisée dans sa partie moyenne ou antérieure sur le cliché de profil.

Les lésions du disque très exceptionnellement isolées se traduisent par un simple



Figure 114 : Fracture de L1 avec effraction du plateau vertébral supérieur (encoche nette).

Aspect un mois $\frac{1}{2}$ après le traumatisme (éjection).



Figure 115 : Fracture sagittale de L3, accident de parachutisme en forêt.



Figure 116 : Fracture de L1 avec éjection du coin antérieur.
Pincement de l'interligne D12, L1 et rupture des
deux murs postérieurs et de résistance (parachutisme).



Figure 117 : Fracture luxation de L1 avec paraplégie (parachutisme)



Figure 118 : Tomographie chez un pilote éjecté (atterrissage nocturne en montagne).
Fracture de L1 avec atteinte du mur de résistance et du mur postérieur.



Figure 119 : Vol à voile - Décrochage à basse altitude.

pincement discal sans lésion osseuse. Pour affirmer ce caractère acquis, il est nécessaire de posséder un examen radiologique antérieur au traumatisme, examen correct au point de vue technique. Le disque ainsi lésé ne se répare jamais. Cette lésion discale conditionne l'apparition plus ou moins rapide de l'arthrose. Enfin, un disque sous jacent à une fracture de hauteur normale, juste après l'accident, peut voir sa hauteur diminuer dans les semaines qui suivent. La discographie des disques sus et sous fracturaires (Goutalier et Bernageau a montré que les lésions ligamentaires discales sont d'autant plus importantes que les lésions fracturaires corporeales sont antérieures et minimes).

Les lésions à distance, fréquentes dans les traumatismes importants, comprennent :

- l'aérocolie réflexe,
- d'autres lésions traumatiques (fractures des membres, du crâne, du thorax).

b) Fracture comminutive et luxation fracture.

Dans la fracture comminutive, le corps vertébral est morcelé en plusieurs fragments, parfois disloqué. Dans la fracture luxation, le principal trait de fracture parcourt obliquement d'arrière en avant et de haut en bas l'arc postérieur et le corps vertébral.

. Forme du corps

Dans la fracture comminutive, la morphologie du corps est profondément modifiée. Il existe un important tassement cunéiforme qui crée une angulation aigüe du rachis à ce niveau. Des fragments antérieurs et latéraux sont expulsés. Sur l'incidence de face, le corps vertébral est élargi, parfois asymétriquement. De profil, les fragments antérieurs débordent nettement en avant. Les fragments postérieurs plus ou moins trapézoïdaux bombent en arrière (fig. 116 et 117).

Dans la fracture-luxation, le trait de fracture continuant celui qui atteint l'arc postérieur, parcourt le corps selon une direction qui est le plus souvent oblique d'arrière en avant et de haut en bas, passant généralement par le tiers supérieur du corps. Il divise la vertèbre lésée comme un os long en 2 ou plusieurs fragments : supérieur et inférieur. Cette description correspond à l'aspect le plus fréquemment rencontré. Dans certains traumatismes violents et complexes où les forces agissent simultanément selon les 3 axes, toute tentative de systématisation est difficile ou parfois même inutile, du fait de l'impossibilité, sans risques majeurs pour le blessé, d'explorer finement et longuement les foyers fracturaires.

. La fracture sagittale du corps (330)ⁿ vertébral (décrite pour la première fois par Guilleminet *) apparaît au cours d'un traumatisme associant une hyperflexion avec une rotation plus ou moins complexe. Cet aspect s'observe rarement : le corps vertébral est séparé par un trait vertical allant de l'interligne sus jacent à la vertèbre fracturée à l'interligne sous jacent. Cette fracture s'accompagne souvent de lésions du ligament interépineux (295)(448) (Fig 115).

Nous avons, ces dix dernières années, rencontré cette variété clinique onze fois, la plupart chez des parachutistes ou des pilotes éjectés ayant eu des difficultés d'atterrissage la plupart en forêts.

. Contours des fragments

Les contours des fragments des fractures récentes sont nets.

. Densité et structure de la plage osseuse

Assez souvent normales, elles peuvent être modifiées par une condensation homogène qui, la plupart du temps, disparaît plus tardivement que dans les fractures stables.

. Atteintes de l'arc postérieur (Fig 118, 123, 124).

- Dans la fracture comminutive, du fait du morcellement du corps vertébral et des déplacements importants, l'arc postérieur est toujours lésé, en particulier au niveau des articulaires qui sont disloquées ou fracturées. Dans certains cas, l'atteinte du mur de résistance vertébrale est particulière. Il apparaît un bombement de la ligne postérieure des corps vertébraux avec une discrète diminution de la hauteur postérieure associée à un léger rétrolisthesis de la vertèbre fracturée (fig 118). Ce tableau s'observe surtout au niveau des vertèbres dorsales situées entre D4 et D8 et moins fréquemment à l'étage lombaire. Dans tous ces cas, le canal rachidien est plus ou moins rétréci. Une sténose de plus de 1/3 de diamètre antéro-postérieur par rapport aux vertèbres sus et sous jacentes, est cause de compression nerveuse potentielle, ou effective et impose la correction thérapeutique (R. Louis) (367 b).

- Dans la fracture-luxation, le trait oblique continu parcourt à la fois le corps et l'arc postérieur. Il disloque les apophyses articulaires, atteint les pédicules, les isthmes ou l'un quelconque des systèmes postérieurs d'attache ou de fixation.

Dans ces deux types de fractures, les déplacements et les troubles statiques sont importants.

La plupart des chirurgiens orthopédistes affirment l'intérêt de la mensuration de la gibbosité, mesure importante dans la surveillance du foyer fracturaire.

Plusieurs techniques peuvent être employées pour cette mesure :

- détermination de l'angle formé par les plateaux supérieur et inférieur de la vertèbre atteinte ;
- établissement du rapport entre hauteur des bords postérieur et antérieur de la vertèbre fracturée ;
- tracé de l'axe du rachis : la ligne passant par les bords antérieurs des corps vertébraux dessine une courbe régulière à grand rayon. L'angle qui résulte du tracé de cette ligne lors d'une ou plusieurs fractures du rachis mesure exactement le tassement, c'est à dire le degré de gibbosité.

Cette dernière méthode est préférable car seule, elle s'applique aux traumatismes multiples. Elle tient compte de la compensation discale fréquente et variable. Une accentuation de plus de 15° de la cyphose dorsale et de plus de 10° de la scoliose sont les limites supérieures de tolérance à longue échéance (R. Louis) (367 bis).

. Lésions associées :

Les disques intervertébraux dans les fractures comminutives et les fractures-luxations sont constamment atteints. Rompus ou détruits, ils se traduisent par des pincements globaux ou partiels. Généralement, c'est le disque sus jacent à la vertèbre fracturée qui est lésé. Mais dans les fractures comminutives, il n'est pas rare que les disques sus et sous jacents soient intéressés par le traumatisme.

Exceptionnellement dans les fractures dorsales (au-dessus de D 10) il apparaît un fuseau paravertébral symétrique ou asymétrique, correspondant à un hématome. D'importance variable, il régresse souvent très rapidement (15 à 20 jours). (Fig 121.122). La signification de sa présence est difficile à préciser : hémorragie des parties molles périrachidiennes ? fracture associée d'une transverse ? Les ligaments interépineux sont arrachés, les lésions des parties molles périrachidiennes sévères.

Les lésions des disques et des ligaments interépineux qui ne se réparent pas spontanément ont de graves répercussions sur l'évolution tardive de ces fractures et les séquelles, mais aussi sur l'évolution immédiate. Elles peuvent constituer un facteur de mobilisation secondaire après réduction.

. Lésions à distance :

Le blessé dans ces traumatismes importants présente généralement plusieurs fractures (membres, crâne, grill costal) ou des lésions du thorax, de l'abdomen.

2. L'arc postérieur

Sommaire particulier

- | |
|--|
| <p>a) Fractures isolées de l'arc postérieur</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fractures des apophyses épineuses - Fractures des apophyses transverses - Fractures des apophyses articulaires <p>b) Fractures de l'arc neural</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fractures au niveau du pédicule - Fractures des lames - Fractures de l'isthme |
|--|

On distingue les fractures isolées de certains éléments de l'arc postérieur et les fractures associées à des lésions stables ou instables, du corps vertébral.

a) Fractures isolées de l'arc postérieur

Il s'agit des fractures des apophyses épineuses, des transverses et articulaires.

Les apophyses épineuses ou transverses normalement protégées par leur matelassage musculaire sont exposées en cas d'impact direct ou d'effort excessif avec brutale contraction.

- Fractures des apophyses épineuses -

Elles succèdent généralement à un traumatisme direct. Le plus souvent, elles siègent au niveau des charnières cervico-dorsales ou dorso-lombaires. Les apophyses épineuses de D1, D2, L1, sont les plus généralement atteintes.

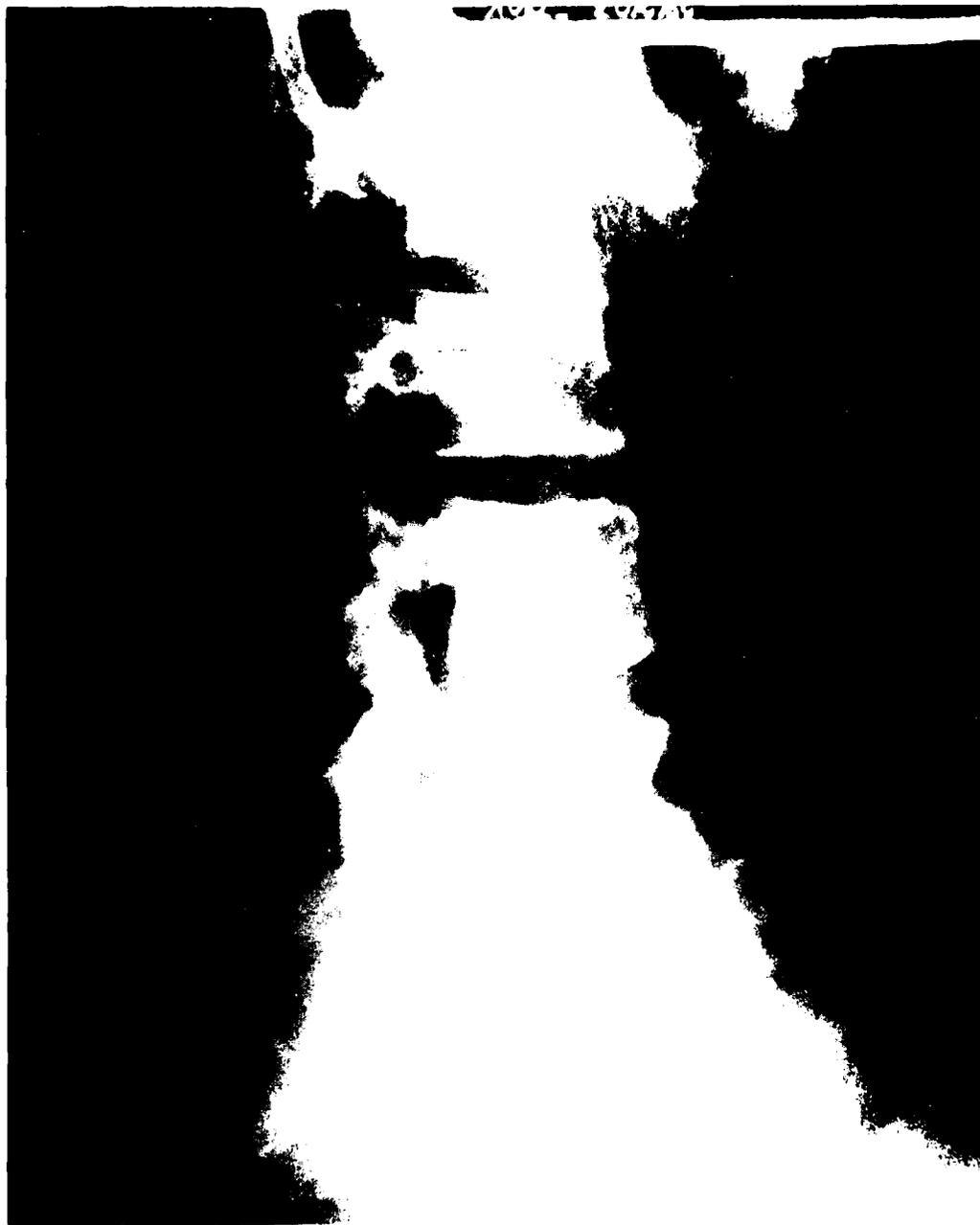


Figure 120 : Fracture complexe L4-L5 avec atteinte neurologique,
syndrome de la queue de cheval et lésions traumatiques
(perforation vessie) et fracture du bassin.



Figure 121 : Hématome visible de face. Fracture de D9 stable (accident de parachutisme)



Figure 122 : même blessé que figure 121 : Fracture de D9 stable.

Hématome régressant en dix jours.



Figure 123 : Crash. Fracture du pédicule gauche de L1.



Figure 124 : Crash, même pilote que figure 123, fracture du corps de L1

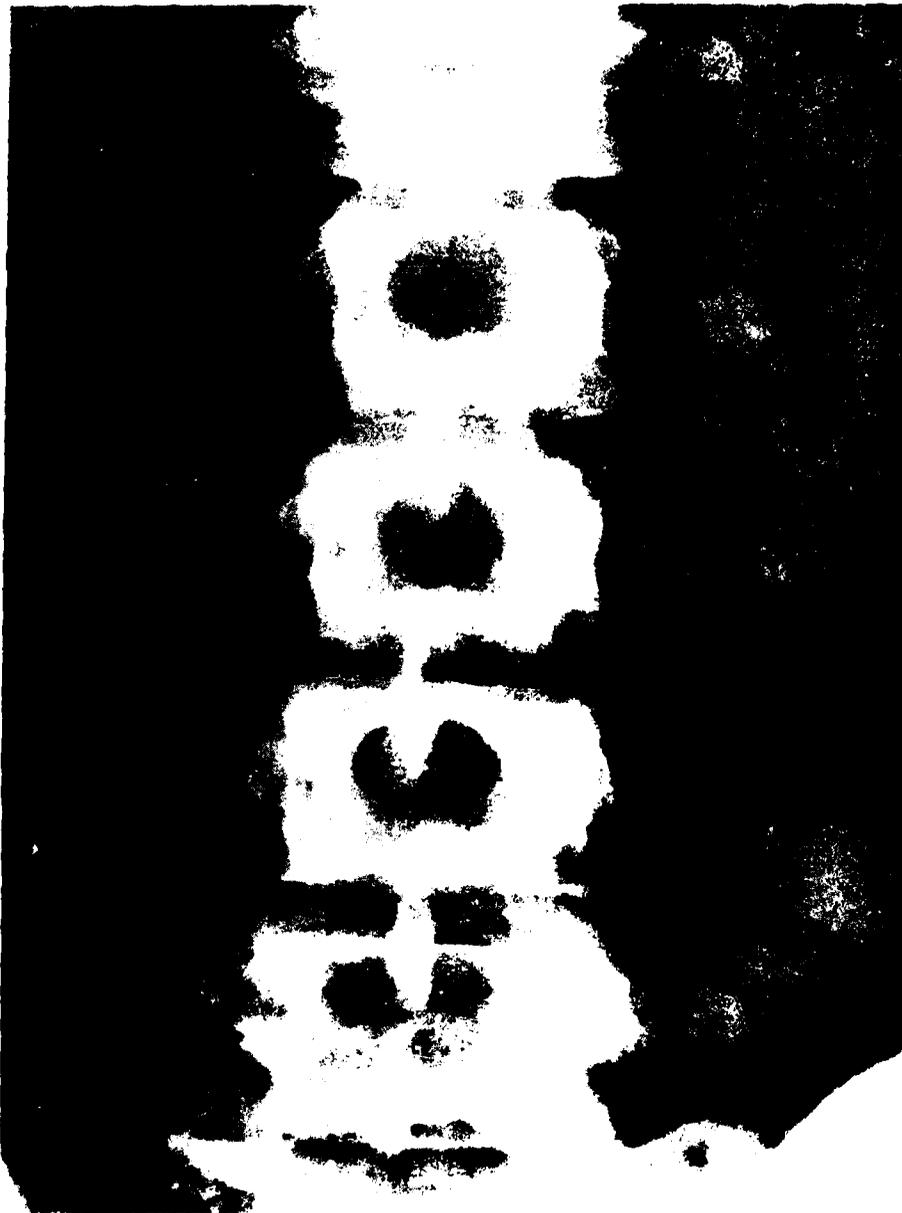


Figure 125 : Crash avion menesieur de tourisme. Fracture
des apophyses transverses gauches de L1, L2, L3.

Elles s'accompagnent d'un déplacement du fragment distal et d'un bombement des parties molles traduisant la présence d'un hématome. Des excoriations cutanées plus ou moins étendues attirent souvent l'attention. Le trait de fracture passe par l'endroit le plus faible de l'apophyse épineuse, la plupart du temps verticalement par le milieu. Les berges du trait sont fines, irrégulières avec parfois un fragment intermédiaire.

- Fractures des apophyses transverses - fig. 125 et 126

Ces fractures, plus fréquentes à l'étage lombaire que cervical, résultent le plus souvent d'un traumatisme direct ou d'un effort musculaire violent. Le trait de fracture intéresse habituellement la partie rétrécie de l'apophyse. Il peut être unique mais le plus souvent siège sur plusieurs apophyses transverses homolatérales. Dans les traumatismes violents, il est possible d'observer des traits de fracture bilatéraux. Le fragment distal se déplace généralement vers le bas, translation commandée par la contraction des carrés des lombes. Le bombement du psoas est dû à un hématome. Dans de très rares cas, le trait transversal de fracture siège dans le prolongement d'une fracture de l'arc postérieur.

Notons que les blessés atteints de fractures des apophyses transverses lombaires souffrent. Ces algies violentes continues, exacerbées par les mouvements, la toux, expliquent que le blessé supporte difficilement le contact avec la table d'examen. Les clichés doivent être d'une très basse tonalité et il faut tenir compte dans l'établissement des éléments d'une importante aéroïlie. Si les clichés sont trop pénétrés, les fractures des apophyses transverses ne sont pas vues.

- Fractures des apophyses articulaires -

Exceptionnelles, à l'état isolé, elles siègent le plus souvent à la colonne cervicale. Quand elles existent au niveau du rachis dorsal ou lombaire, elles accompagnent des fractures généralement comminutives.

b) Fractures de l'arc neural

Elles intéressent les pédicules, les lames, les isthmes. Elles sont associées à des fractures de corps vertébral instables le plus souvent.

- Fractures au niveau du pédicule -

Ces fractures exceptionnelles s'observent par choc direct (balle par exemple) où le trait de fracture en parcourant l'arc postérieur atteint le pédicule. En apparaissant ces lésions libèrent pratiquement toujours le corps vertébral de son arrimage postérieur. C'est le cas des désinsertions pédiculaires des fractures complexes instables avec rupture du mur postérieur et du mur de résistance.

- Fractures des lames -

Les fractures isolées des lames, très rares, surviennent après un choc direct. Le plus souvent, elles sont contemporaines des fractures des apophyses épineuses et de luxations interapophysaires. Le trait de fracture irrégulier, fin, se différencie facilement de la fente congénitale (déhiscence de l'arc postérieur). En cas de bilatéralité, le corps vertébral se déplace en avant. Elles sont associées le plus souvent aux fractures complexes de l'arc antérieur et à la rupture de l'arc postérieur.

- Fractures de l'isthme -

L'isthme, simple pont osseux reliant les articulaires supérieures aux articulaires inférieures n'est pas, comme on l'a cru, un point faible constitutionnel de l'arc vertébral. La connaissance de la dynamique rachidienne nous montre que du fait de la répartition différente des forces sur les colonnes antérieure et postérieure, le corps vertébral se tasse avant que l'isthme ou la lame se fracturent. L'image de spondylolyse ou de spondylolisthésis est pratiquement toujours congénitale. Les observations de cas traumatiques isolés de lésions de l'isthme doivent répondre aux critères suivants :

- examen antérieur au traumatisme techniquement correct (comprenant incidences standards et tomographies) ;

- examen postérieur au traumatisme montrant l'apparition d'un trait irrégulier au niveau de l'isthme.

La plupart des experts en médecine légale estiment que la spondylolyse et le spondylolisthésis ne sont pratiquement jamais d'origine traumatique. Il va sans dire que certains traumatismes (balle par exemple) atteignant l'arc postérieur sont susceptibles de créer des spondylolisthésis au sein d'un tableau radiologique complexe comprenant de multiples lésions traumatiques.

L'association de fractures corporales instables et de fractures des éléments de l'arc neural est bien illustrée par la notion d'atteinte du segment vertébral moyen de ROY CAMILLE. La notation numérique de R. Louis donne pour instable des fractures complexes dont l'addition chiffrée des éléments est supérieure à 2 (367).



Figure 126 : Atterrissage difficile après éjection, fractures
des apophyses transverses droites de L1, L2.

Cet auteur attribue : 1 point au solution de continuité complète discorporéale et apophyso articulaire, 0,5 point pour les solutions de continuité incomplète d'une colonne de stabilité verticale, sur les trois, ou à une rupture complète d'un pont de stabilité horizontale sur les deux.

3. Les lésions ligamentaires

Rappelons quelques signes indirects de leur présence. Ligament interépineux sa rupture se traduit de face par une augmentation de la distance entre deux épineuses. Elle ne peut être supérieure à 1 $\frac{1}{2}$ fois celle de l'espace sous et sus jacent, et de profil par le baillement de 2 apophyses épineuses.

Le ligament commun vertébral antérieur

. Sa rupture est probable dans les fractures tassement cunéiforme avec éjection du coin antéro-supérieur.

. Sa rupture est certaine dans les fractures arrachements du coin antéro inférieur de l'axis. Cette fracture est d'ailleurs instable en extension.

Le ligament commun vertébral postérieur

Sa rupture est généralement certaine en cas d'atteinte importante du mur postérieur et lorsqu'il existe une subluxation antérieure cervicale. Cette dernière se caractérise essentiellement par l'existence de signes en flexion qui disparaissent en extension.

5.5.3. CLASSIFICATION DES FRACTURES DU RACHIS

La complexité des fractures et des luxations du rachis explique la grande diversité des classifications des fractures de la colonne vertébrale. Récemment, plusieurs auteurs ont insisté sur l'intérêt de différencier les formes anatomo-radiologiques selon leur mécanisme causal (extension, flexion, extension et rotation, flexion et rotation, flexion latérale).

Pour notre part, nous estimons que cette classification nouvelle ne répond pas au souci légitime d'efficacité thérapeutique. Aussi, suivrons nous pour notre étude le plan classique qui envisagera successivement l'exposé des fractures dorso-lombaires puis les localisations cervicales. Enfin, nous continuerons à opposer les fractures stables aux fractures instables.

Nous disposons de deux statistiques différentes (Tableau 5-17).

La première provient de fractures du rachis observées et traitées dans les hôpitaux militaires Percy à CLAMART et Dominique Larrey à VERSAILLES, de 1960 à 1966 inclus. 307 blessés atteints de 411 fractures ont été suivis.

La deuxième contient tous les cas observés à l'Hôpital Militaire Bégin de 1970 à 1979 inclus (blessés vus précocément et suivis régulièrement) et de tous les cas vus en expertise et en surexpertise.

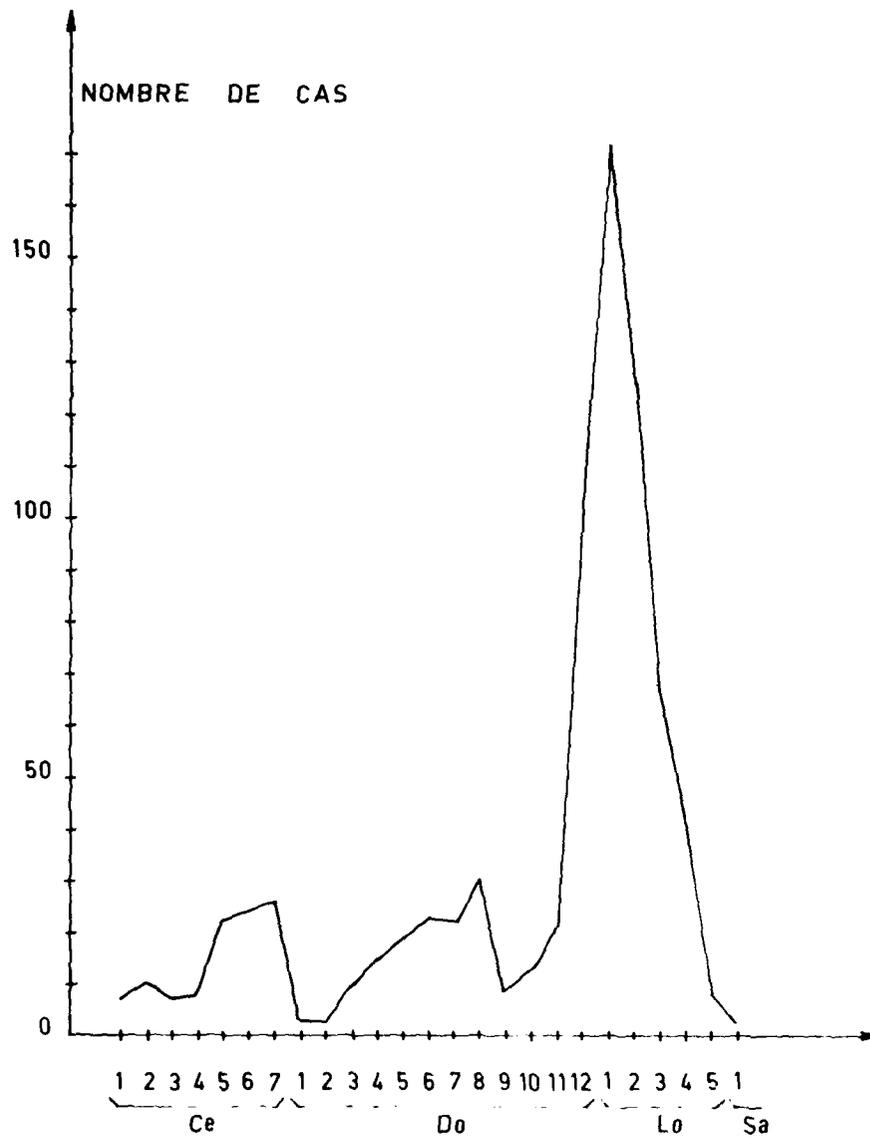


Figure 127 : Statistique personnelle des fractures du rachis
 (806 cas vus et traités dans les hôpitaux
 D. Larrey à Versailles, Béhé à Saint-Denis
 et Percy à Clamart).

TABLEAU 5 - 17

Vertèbre atteinte	Statistique I 1960 - 1966	Statistique II 1967 - 1979	Total	% sur le total	
C 1	3	4	7	0,86	
C 2	4	6	10	1,24	
C 3	2	5	7	0,86	
C 4	3	5	8	0,99	12,90%
C 5	12	10	22	2,72	des 806 fractures
C 6	13	11	24	2,97	
C 7	12	14	26	3,22	
D 1	1	2	3	0,37	
D 2	1	2	3	0,37	
D 3	6	4	10	1,24	
D 4	7	8	15	1,86	
D 5	9	10	19	2,35	35,06%
D 6	11	12	23	2,85	
D 7	10	12	22	2,72	
D 8	16	14	30	3,72	
D 9	4	5	9	1,11	
D 10	6	7	13	1,61	
D 11	11	10	21	2,60	
D 12	57	58	115	14,26	
L 1	89	81	170	21,09	
L 2	69	57	126	15,63	
L 3	36	31	67	8,31	51,59%
L 4	25	19	44	5,45	
L 5	4	5	9	1,11	
S 1		3	3	0,37	
TOTAL	411	395	806		

Sur 806 fractures du rachis, provenant de deux statistiques de services de chirurgie orthopédique, de rhumatologie et de radiologie, observées chez 602 sujets, nous constatons chez des blessés d'origine très variée (accidents de la route, accidents sportifs, accidents aériens après éjection, parachutisme), par ordre de fréquence décroissante (fig. 127).

- la charnière dorso-lombaire (D11 - D 12 - L 1 - L 2)
- la colonne lombaire
- la colonne dorsale moyenne et basse (D 5 à D 10)
- la colonne cervicale haute (C 5 - C 7)
- la colonne dorsale haute (D 1 - D 4)
- la colonne cervicale haute.

La violence de plus en plus grande, des traumatismes, explique le nombre important de blessés ayant des fractures multiples (293) (375). (Tableaux 5-18 et 5-19).

Nombre vertèbres fracturées	Nombre blessés observés - Statist. I	Nombre vertèbres fracturées
1	240	240
2	45	90
3	12	36
4	6	24
5	3	15
6	1	6
Total..	307	411

Tableau 5 - 18 : Statistique I (1960-1966 inclus)

Nombre vertèbres fracturées	Nombre blessés observés - Statist. II	Nombre vertèbres fracturées
1	221	221
2	54	108
3	10	30
4	7	28
5	2	10
6	1	6
Total...	295	393

Tableau 5 - 19 : Statistique II (1967-1979 inclus)

Les fractures multiples apparaissent dans 21,02% des cas (statistique I) et 25% des cas (statistique II), ce qui justifie la pratique systématique de radiographies de l'ensemble de la colonne vertébrale dans tous les traumatismes un peu sévères et plus particulièrement dans les accidents aériens.

De l'étude des fractures multiples de ces deux statistiques, il est possible de retenir la fréquence de certaines associations :

- atteinte de la charnière D12-L1 et de D11 et de L2
- grand nombre de fractures lombaires multiples,
- association d'une fracture de la charnière D12-L1 ou d'une fracture dorsale moyenne (le plus souvent) ou haute,
- fréquence des atteintes multiples des apophyses transverses.

Type de Traumatisme	Localisations les plus fréquentes	Localisations les moins fréquentes	Localisations exceptionnelles
Crash avions légers	Charnière dorso-lombaire D 10 - L2	Dorsales hautes ou moyennes	Lombaires basses
Crash hélicoptères	Charnière dorso-lombaire D 10 - L 2	Lombaires basses	Dorsales hautes ou moyennes
Parachutisme	Charnière dorso-lombaire D 10 - L 2	Dorsales hautes ou moyennes Lombaires basses	C 5 - C7
Ejection	Charnière dorso-lombaire	Dorsales hautes ou moyennes	Lombaires basses

Tableau 5 - 20 : indiquant les différentes localisations des fractures vertébrales en médecine aéronautique d'après DELAHAYE et Coll. (52)

Le tableau 5 - 20 indiquait la répartition des fractures du rachis en médecine aéronautique dans la 1ère édition de ce fascicule. Les nombreux blessés observés depuis cette rédaction et les multiples cas examinés en surexpertise pour aptitude ou pour détermination de pension, nous permettent d'affirmer que ce tableau reste valable dans la plupart des cas rencontrés en pratique aéronautique. Cette appréciation nous confirme, une fois de plus, l'intérêt d'un bilan complet du rachis.

5.5.4. ETUDE RADIOLOGIQUE DES FRACTURES DU RACHIS DORSO LOMBAIRE

Elles représentent 85% des fractures du rachis de la pratique générale, bien plus encore en pratique aéronautique. Elles se répartissent entre D6 et D8 d'une part, et D11 et L4 d'autre part. Elles sont stables dans leur majorité. Les fractures multiples représentent environ 15% des cas.

5.5.4.1. Les fractures stables

Différentes variétés anatomoradiologiques peuvent être individualisées : fracture tassement latente du corps vertébral, fracture marginale, fracture-tassement cunéiforme antérieure, fracture isolée de l'arc postérieur (274)(277)(283)(293)(448).

1. La fracture tassement latente du corps vertébral doit être recherchée avec soin car elle risque de passer inaperçue. Il faut mettre en évidence sur les incidences de profil (standard et tomographique) une très discrète angulation du bord antérieur du corps vertébral, parfois une simple densification en bande de la région équatoriale du corps vertébral (forme de G. Marchant).

2. La fracture marginale intéresse presque toujours le plateau supérieur d'une ou de plusieurs vertèbres adjacentes.

3. La fracture tassement cunéiforme antérieur dont nous avons précisé antérieurement sa séméiologie et ses différents degrés.

Le diagnostic différentiel des fractures tassement cunéiforme en médecine aérospatiale suppose une connaissance approfondie des variations morphologiques des corps vertébraux et de certaines anomalies du développement disco-vertébral qui ne doivent pas être confondues avec des altérations ou des séquelles traumatiques. Il s'agit en réalité d'une démarche intellectuelle facile.

Nous étudierons successivement :

- les variantes morphologiques pouvant prêter à confusion avec une fracture vertébrale
- les altérations dues à un trouble de développement du corps vertébral ou du complexe disco-vertébral (les coins antérieurs, les hernies rétro - marginales, les encoches de Schmorl).

Les variantes morphologiques :

Les vertèbres peuvent présenter de nombreuses variantes dans leur aspect morphologique. La plus fréquente est représentée par les vertèbres à tendance cunéiforme d'origine congénitale et qui peut faire discuter une étiologie traumatique.

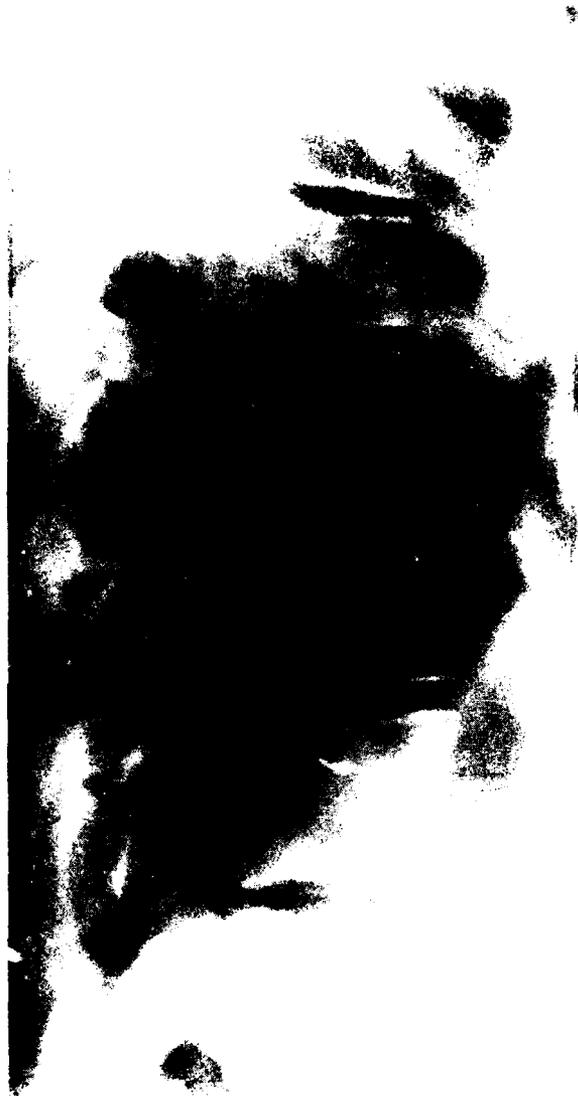


Figure 128 : Déformations cunéiformes de D7.



Figure 129 : déformations cunéiformes de D12, L1

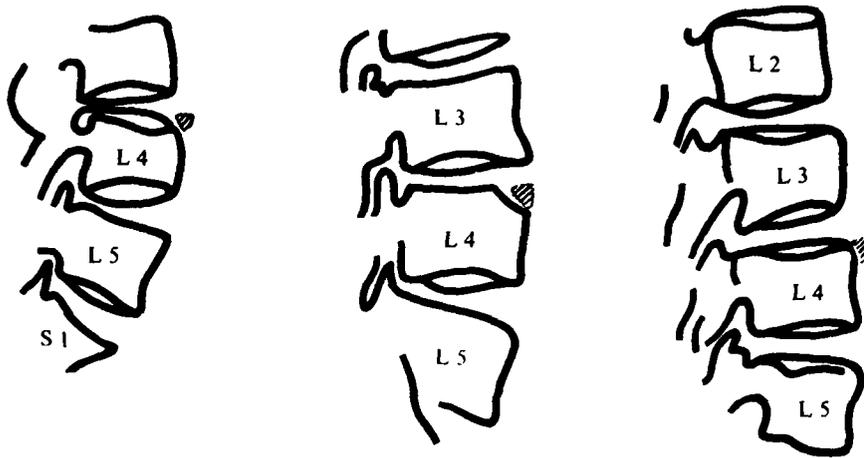
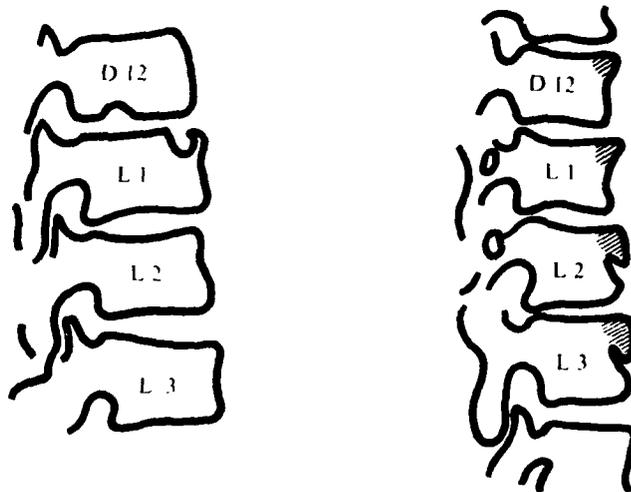


Figure 130 : Diagnostic des coins antérieurs d'après DECOULX.



La hernie rétro-marginale

Fractures multiples récentes.

Figure 131 : Hernie rétro-marginale antérieure et fractures multiples récentes.

- Définition de la vertèbre cunéiforme -

La notion de vertèbre cunéiforme n'a pas toujours été précise et sa définition varie avec les auteurs. Il faut distinguer :

- . la vertèbre cunéiforme vraie d'étiologie traumatique,
- . la vertèbre à tendance cunéiforme.

Dubouloz, Legre, Merjanian et Serratrice (304) dans une étude statistique des corps vertébraux à tendance cunéiforme, ont choisi de tenir compte en vue frontale des différences de hauteur supérieures à 2 mm d'un côté par rapport à l'autre. De profil la différence entre le bord antérieur et le bord postérieur doit être égale ou supérieure à 3 mm pour L1 et à 2 mm pour les autres vertèbres. Ces dernières données numériques peuvent être admises comme représentant les critères d'une vertèbre à tendance cunéiforme. Nous pensons que seul le cliché de profil présente une réelle valeur dans ces déterminations.

En plus de ces données numériques, il nous paraît opportun de rappeler, avec de Sèze et Djian, qu'une vertèbre à tendance cunéiforme possède des coins réguliers, non détruits, sans altération de structure et de densité. Cette vertèbre est habituellement le résultat d'une anomalie congénitale. Dans les cas douteux, malgré ces définitions qui peuvent paraître précises, il est bien évident que pour affirmer le caractère acquis d'un tassement, il faut tenir compte :

- . de l'examen comparatif des clichés effectués antérieurement et au moment de l'accident,
- . des données des tomographies face et profil de la vertèbre suspectée.

L'intérêt médico-légal apparaît évident.

- Vertèbres à tendance cunéiforme (52)(264)(287)(288)(304)

Ces variantes morphologiques existent d'une façon certaine, et nous les rencontrons fréquemment dans notre pratique journalière.

Brocher souligne que les vertèbres dorsales présentent un aspect très modérément cunéiforme de manière toute physiologique.

Ces vertèbres de tendance cunéiforme se rencontrent électivement aux centres de courbure physiologique :

- . D6 pour la colonne dorsale,
- . D12 et L1 à la charnière dorso-lombaire.

L'intérêt de bien connaître ces aspects est primordial dans le diagnostic des tassements cunéiformes traumatiques de l'aviateur ou du parachutiste, puisque des zones représentent également le point d'élection des lésions (fig. 128 et 129).

Les erreurs par excès ou par défaut doivent être absolument évitées, et nous insisterons sur l'interprétation de la structure et sur la faible diminution de hauteur des vertèbres à tendance cunéiforme.

Notre tâche a toujours été facilitée chez l'aviateur par l'existence du dossier radiologique de référence. Ce diagnostic différentiel ne pose pas en pratique de problème essentiel.

Les altérations dues à un trouble du développement du corps vertébral et du complexe disco-vertébral

Ces altérations morphologiques de caractère pathologique posent au radiologiste des problèmes diagnostiques apparemment plus difficiles que ceux des variantes cunéiformes précédemment étudiées.

En fait, la connaissance de l'embryologie des corps vertébraux et des aspects réalisés évitera de commettre des erreurs par excès. Pour Decoux, le diagnostic différentiel est facile, mais il insiste cependant sur les erreurs fréquemment commises, même par des radiologistes confirmés. En conséquence, 3 types de lésions doivent être étudiées :

- l'absence de soudure des coins vertébraux de l'adulte,
- la hernie rétro-marginale antérieure (de Sèze et Rotes-Guerol),
- les séquelles d'épiphyose.

- L'absence de soudure des coins vertébraux de l'adulte
(paradiscal defect des auteurs anglo-saxons (52)

Cette anomalie extrêmement fréquente a été décrite dans la littérature sous les noms :

- . apophyse persistante du rachis,
- . déficience paradisciale antérieure,



Figure 132 : Coin antérieur de L4

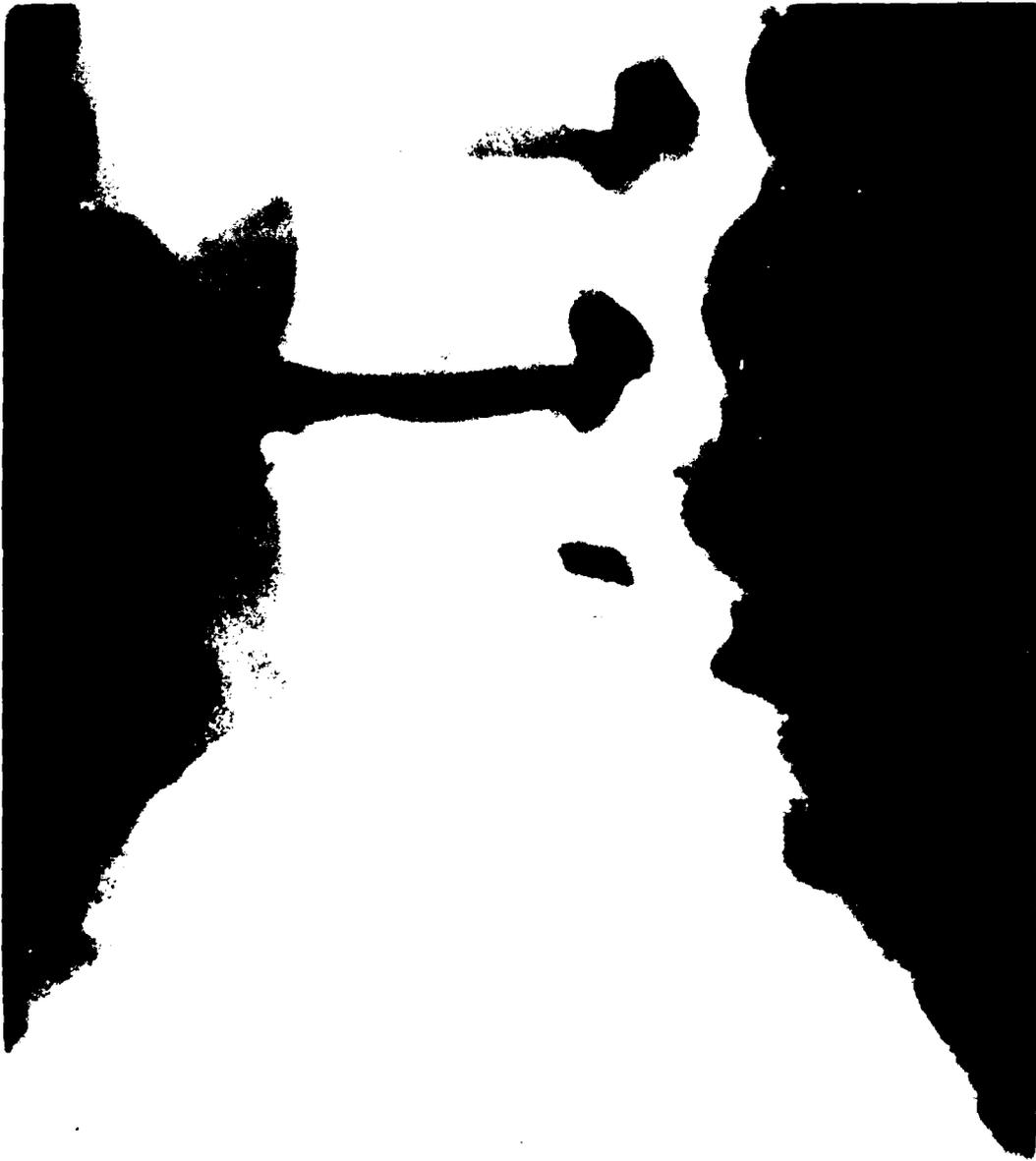


Figure 152 : Coïn antérieur de L 4.

- . ostéochondrose vertébrale disséquante de l'adulte (Galland)
- . persistance des coins épiphysaires.

Le terme d'épiphyse vertébrale, pour Schmorl et Junghans, est impropre, car il s'agit d'un anneau marginal. Sur les clichés de profil d'enfant, on observe souvent un trait clair situé à la base d'implantation d'un ou plusieurs angles vertébraux.

Les angles vertébraux apparaissent alors comme de petits fragments triangulaires arrondis, détachés du corps vertébral (fig 130). Chez l'enfant, ces images sont normales puisque la soudure a lieu physiologiquement vers l'âge de 21-22 ans. Leur persistance chez l'adulte traduit un trouble de développement qui a empêché la soudure normale.

La séparation du fragment et du corps vertébral le plus souvent complète, est parfois incomplète. Le siège de l'altération le plus fréquemment rencontré est le coin antérieur et supérieur du corps vertébral (L1, L2 ou L3). Le coin antérieur et inférieur est rarement intéressé.

Le coin vertébral libre est séparé du corps par un trait rectiligne clair et régulier et engrené des fractures marginales (fig 131 et 132).

Alors que le " paradiscal defect " va rester identique à lui-même sans tendance à la soudure, la consolidation d'une fracture marginale s'accompagnera d'une déformation tout à fait caractéristique : l'irrégularité de la courbure de la face antérieure du corps vertébral (décrochage).

Il est rare que le coin détaché s'inscrive exactement dans les contours du corps vertébral. Il est soit petit, atrophique et même punctiforme, soit trop gras par excès de croissance et débordant les contours vertébraux. Ce coin antérieur libre peut être associé à des lésions de séquelles d'épiphyse vertébrale de Scheuermann. Le corps vertébral garde une forme normale le plus souvent mais il peut être cunéiforme à base postérieure.

Certains auteurs estiment que le coin antérieur, même isolé, fragilise le disque adjacent et le voue à une dégénérescence plus précoce. Nous avons pu suivre des coins antérieurs libres, isolés de L1 ou de L2 ou de L3 qui ne sont pas accompagnés d'une évolution très rapide vers l'arthrose.

L'existence de cette absence de soudure chez un traumatisé a entraîné parfois des erreurs par excès. Pourtant les caractères radiologiques de cette anomalie sont facilement reconnaissables. Dans les différentes statistiques de pratique courante ou de médecine aéronautique, nous avons observé à plusieurs reprises cette anomalie.

Dans un cas très particulier, l'examen détaillé du dossier radiologique d'un pilote d'avion conventionnel à hélices a permis d'éliminer formellement le diagnostic de fracture posé antérieurement à l'étranger.

Nous insisterons sur l'intérêt d'une technique parfaite dans la prise du cliché de profil : une rotation discrète amène une superposition du corps vertébral et du coin antérieur donnant l'illusion d'un fragment fracturé qui base. Dans un cas semblable, pour éliminer toute discussion d'interprétation, la tomographie apporte une preuve irréfutable de la nature de l'anomalie, en détaillant la régularité de la solution de continuité, l'aspect régulier des contours, l'intégrité de la structure du fragment détaché.

L'examen du dossier de référence est toujours très utile.

- La hernie rétro-marginale antérieure (fig 134)

S. de Sèze et Rotes-Auerol (421)(422) décrivent, sous le nom de hernie rétro marginale antérieure, une échancrure très spéciale du plateau vertébral supérieur d'une vertèbre dorsale ou lombaire.

Cette anomalie est de diagnostic facile. Sur le profil, elle présente une pente douce en arrière et une chute abrupte en avant. Elle est entourée d'une zone de densification osseuse.

Sur l'incidence de face, elle a un aspect en large coupole ou de cupule surhaussée. Cette encoche peut s'accompagner d'une diminution globale de la hauteur du disque intervertébral. Parfois, il existe une excroissance ostéophytique en avant du rebord vertébral.

Pour de Sèze (421), cette altération ne relève pas d'une origine traumatique mais toujours d'une dystrophie de croissance. Elle se produit généralement au niveau d'une zone de moindre résistance antérieure du tissu spongieux vertébral qui est oblique en bas et en avant.

Cette hernie rétro-marginale antérieure, variété de hernie intraspongieuse, s'observe souvent dans la maladie de Scheuermann et ses séquelles. Elle est généralement associée

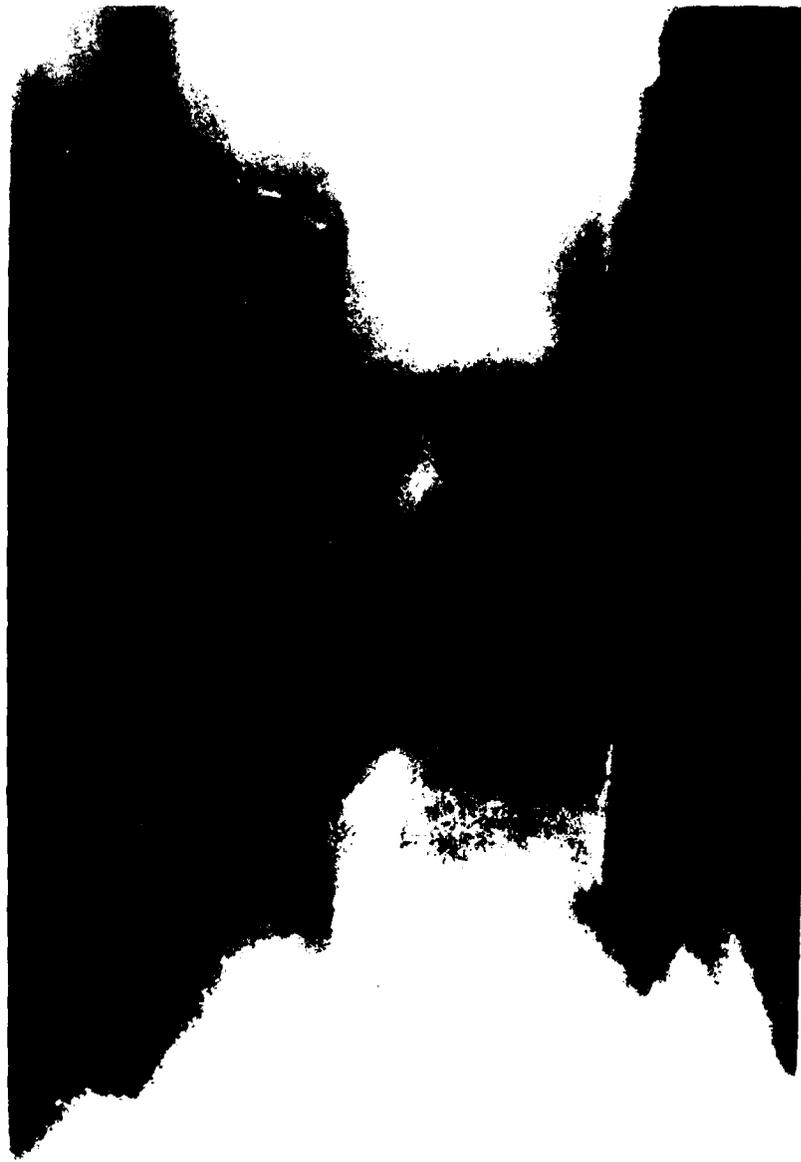


Figure 114 : Colonne lombaire - Association de hernie rétromarginale et de coin antérieur.

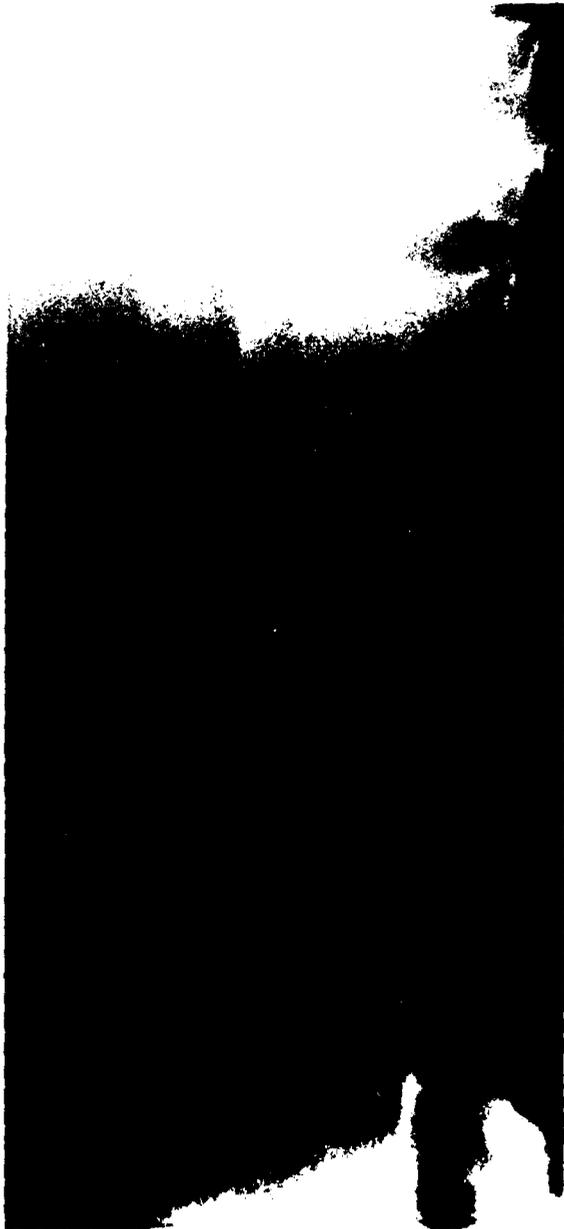


Figure 155 : Hernie rétromarginale antérieure de l'œsophage.



Figure 136 : Fracture tassement de L1 avec atteinte du mur postérieur myélographie à l'ampaque
(Pr BOCQUET Val-de-Grâce)



Figure 137 : Fracture tassement de L1 avec paraplégie. Myélographie à l'ampaque.
(Pr BOCQUET Val-de-Grâce)

aux autres signes caractéristiques de l'affection mais il est possible de rencontrer la hernie rétromarginale à l'état isolé (363).

Des examens radiologiques (standard et tomographies) suffisent pour affirmer le diagnostic de hernie rétromarginale et éliminer celui de fracture parfois posé.

- Les séquelles d'épiphyses type Maladie de Scheuermann (278)(319) sont responsables de déformation cunéiforme, d'irrégularités et de feuilletage des plateaux vertébraux. Mais il n'existe ni densification de la plage du corps vertébral ni déformation des angles antéro-supérieurs.

Les fractures isolées de l'arc postérieur (429)

Nous avons vu le détail de leur séméiologie dans l'étude des signes élémentaires.

La fracture des lames est stable au dessus de L4. Elle peut être difficile à mettre en évidence sur le cliché standard lorsque l'arc postérieur est abordé obliquement. Une inclinaison judicieuse du rayonnement direct en l'aborde perpendiculairement. Les incidences de 3/4 et les coupes tomographiques facilitent le diagnostic de ses traits de fractures.

Les fractures des apophyses transverses passent parfois inaperçues, la fracture intéresse souvent plusieurs transverses du même côté. Il faut rechercher un bombement de l'ombre du psoas, témoin d'une hémorragie rétropéritonéale et penser à une éventuelle atteinte rénale traumatique en cas de localisation de fracture de la transverse de L1 ou L2 (293)(369) (fig. 125 et 126).

La fracture de l'épineuse isolée est rare au rachis lombaire (elle est en relation avec un choc direct, fracture de CHANCE par flexion latérale).

5.5.4.2. Les fractures instables

plus rares que les précédentes, représentent en pratique aéronautique 8% de l'ensemble des fractures du rachis dorso-lombaire . Plus graves, elles exposent le traumatisé à des lésions nerveuses (paraplégie, syndrome de la queue de cheval). Ces lésions surviennent au moment du traumatisme comme complications secondaires (mobilisation intempestive) séquellaires (réduction du diamètre du canal rachidien : osseuse ou hernie discale post traumatique, décompensation de troubles statiques (cyphose aggravée de plus de 15°, ou scoliose de plus de 10°).

Le rôle du radiologue est d'affirmer l'instabilité et les conséquences de la fracture sur la statique rachidienne et la morphologie du canal rachidien.

Nous avons vu qu'il fallait distinguer :

1. La fracture comminutive (337)(338)

La force qui la réalise est une force de compression qui s'exerce d'arrière en avant, les signes d'instabilité sont habituellement évidents sur les deux incidences. Il est à noter que les lésions des parties molles voisines sont particulièrement importantes et bien visibles en scannographie (hématome, rupture de dorsale). Les lésions ligamentaires discales sont également marquées.

2. La fracture-luxation

est consécutive à un traumatisme qui s'exerce perpendiculairement à l'axe du rachis repoussant en avant la partie supérieure de la colonne vertébrale. Le trait de fracture est oblique d'arrière en avant et de haut en bas passant par le tiers supérieur du corps vertébral. Les signes d'instabilité sont évidents. Ces fractures réalisent deux aspects différents selon que persiste ou non l'accrochage des articulaires.

Les explorations à l' AMIPAQUE (Myélographies, fig. 136 et 137) fournissent des données fondamentales sur l'influence du foyer fracturaire sur la moëlle

3. La fracture des lames de L5 (fig 119-120)

Habituellement secondaire à un choc direct elle est instable, on a intérêt à orienter le rayon directeur perpendiculairement au plan des lames, et à pratiquer une étude tomographique.

5.5.5. ETUDE RADIOLOGIQUE DES FRACTURES DU RACHIS CERVICAL (C3 - C7)

5.5.5.1. Généralités

La colonne cervicale est le segment le plus mobile du rachis. A cette mobilité, s'ajoutent l'importance des forces d'inertie du crâne (370), lors des traumatismes, la faible hauteur des vertèbres, et la présence de la moëlle épinière moins bien protégée qu'aux étages inférieurs. Ces diverses caractéristiques expliquent la fréquence des lésions graves avec participation neurologique. Ramadier et Bombart (404) sur 152 fractures du rachis cervical, observent 50 lésions médullaires et 36 atteintes radiculaires. Witley et Forsyth isolent 77 lésions nerveuses sur 159 fractures du rachis cervical (450).

En raison des caractères anatomiques, physiologiques et fracturaires différents, deux zones doivent être considérées :

- . la charnière cervico-occipitale C1 - C2
- . la région sous jacente de C3 à C7

Pour Witley et Fosyth (450), la répartition est :

27% pour C1-C2 et 73% en C3-C7. Dans nos statistiques (voir précédemment), nous observons 70 fractures en C5 - C7, 15 en C3-C4 et 17 en C1-C2.

Les atteintes traumatiques du rachis cervical en médecine aérospatiale sont rares, mais il faut insister dans notre pratique sur l'apparition de ces lésions dans leur vie extra aéronautique (accidents de la route, de sport) et sur leur retentissement professionnel.

Les travaux consacrés aux lésions traumatiques sont très nombreux (260)(262)(263)(272)(273)(280)(284)(293)(298)(306)(308)(316)(320)(340)(341)(343)(375)(376)(388)(399)(403)(404)(432).

5.5.5.2. Etude analytique des lésions traumatiques de C3-C7

5.5.5.2.1. Rappel de notions très importantes : l'instabilité est fréquente

5.5.5.2.2. Les luxations :

- . La luxation bilatérale ou symétrique
- . La luxation unilatérale ou asymétrique

5.5.5.2.3. Les entorses et traumatismes mineurs

5.5.5.2.4. Les fractures :

- . Le tassement cunéiforme antérieur
- . La " tear drop fracture "
- . La fracture par éclatement
- . Les fractures comminutives
- . Les fractures luxations
- . Les localisations particulières

5.5.5.2.1. Rappel de notions très importantes :

Nous insisterons sur un certain nombre de repères :

- sur le cliché de face strict en position indifférente les épineuses sont alignées et la distance qui les sépare est à peu près égale. Toute déviation de la ligne des épineuses est le témoin d'une luxation unilatérale, toujours augmentation de la distance entre deux épineuses indique une luxation.
- sur le cliché en profil strict, les articulaires sont superposées. Si elles apparaissent dédoublées à partir d'un niveau déterminé alors qu'elles sont superposées au-dessous, il faut rechercher une fracture des articulaires. Le dédoublement indique une rotation.
- Les lésions traumatiques du rachis cervical sont souvent instables. La définition du segment moyen de Roy Camille est particulièrement bien adaptée au niveau du rachis cervical. L'atteinte d'un de ces éléments constitutifs : mur postérieur avec surtout ligamentaire, les pédicules, les massifs articulaires, fait suspecter à priori l'instabilité.
- Cette instabilité n'est pas toujours évidente, sur les clichés standards. On est quelquefois obligé de pratiquer dans un second temps des épreuves dynamiques prudentes. Celles-ci permettent d'affirmer l'instabilité si :
 - . le mouvement d'angulation d'un corps vertébral par rapport à la vertèbre sous jacente est supérieure à 7° à 11°.
 - . en flexion, l'antélisthesis est supérieur à 2 à 3,5 mm au dessus de C4 et supérieur à 2 mm au dessous de C4.
 - . les articulaires se découvrent de plus de 50%.

Ces mouvements anormaux traduisent une rupture complète d'un système de frein ligamentaire.

5.5.5.2.2. Les luxations de la colonne cervicale :

Survenant généralement au cours d'une hyperflexion accompagnée d'un mouvement de rotation, ces luxations se définissent anatomiquement par la perte de contact des articulaires, les articulaires supérieures se déplaçant en avant des inférieures (Decoulx) (280).

Les sièges de prédilection sont C5-C6 et C6-C7. Avec A. Sicard (424) et G. Lavarde (360 bis), on distingue deux variétés : une bilatérale, symétrique et une unilatérale, asymétrique



Figure 138 : Fracture-luxation C5-C6 (parachutisme)



Figure 139 : Fracture-luxation C4-C5 (parachutisme)

AD-A101 449

ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT--ETC F/6 6/5
PHYSIOPATHOLOGIE ET PATHOLOGIE DES AFFECTIONS DU RACHIS EN MEDE--ETC(U)
APR 81 R DELAHAYE, R AUFFRET, P DOURY
AGARD-AG-250 (FR)

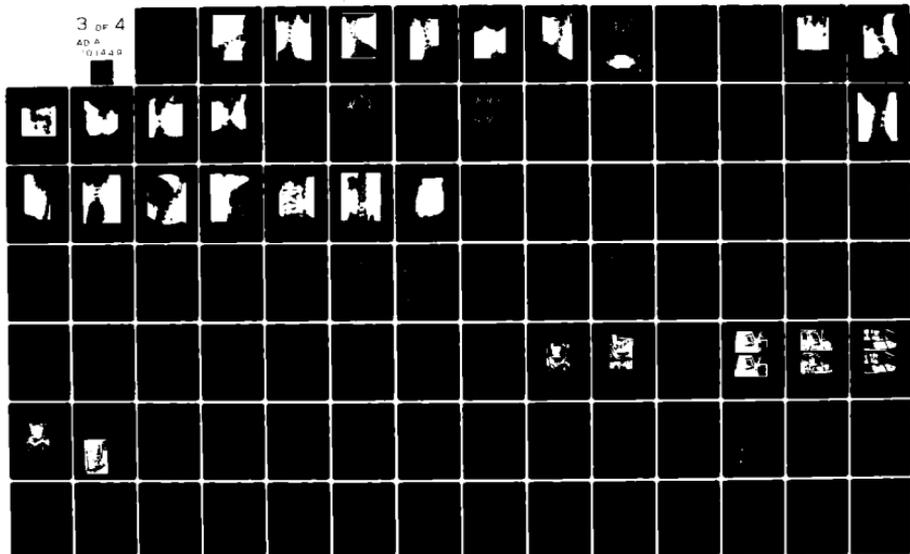
UNCLASSIFIED

NL

3 OF 4

AD-A

101419



- La luxation bilatérale ou symétrique (fig 138 et 139)

Elle est créée par une atteinte des apophyses articulaires inférieures de la vertèbre sus jacente venue se placer en avant des articulaires supérieures de la vertèbre sous jacente. Il se produit un accrochage irréductible. Les différents auteurs ne semblent pas d'accord sur l'estimation de la fréquence de l'association d'une fracture des articulaires. Quoiqu'il en soit, il s'agit d'une lésion grave entraînant un rétrécissement du canal rachidien et souvent une compression de la moëlle épinière.

L'incidence de profil seule, est susceptible de mettre en évidence des déplacements. C'est tout l'intérêt d'utiliser une potence télescopique ou un arceau pour obtenir des incidences de profil en décubitus dorsal, sans mobiliser le malade. Le cliché de face peut être normal.

Cas particulier : la subluxation transitoire de Watson-Jones (448) visible sur les incidences dynamiques.

- La luxation unilatérale ou asymétrique (415)

Elle est due soit à une fracture d'une seule apophyse articulaire, soit à une luxation (avec accrochage). Le diagnostic radiologique de cette variété est plus difficile, du fait de la rotation vertébrale dans le plan horizontal que peut rétrécir un trou de conjugaison. De face, on recherchera le décalage des apophyses épineuses mais c'est souvent un signe peu fiable. En effet, plus de 40% de jeunes sujets présentent une attitude scoliotique de la colonne cervicale. Le profil et surtout les obliques qui peuvent affirmer le rétrécissement du trou de conjugaison seront complétés par des tomographies en incidence oblique (lames, trou de conjugaison, articulaires).

5.5.5.2.3. Les entorses et traumatismes mineurs.

De Rackers et Ectors (402) ont démontré l'intérêt de l'étude radiodynamique dans le bilan des entorses et traumatismes mineurs du rachis cervical. R. Louis (367) insiste récemment sur l'importance du dépistage des entorses graves et donne les critères qu'il utilise.

. Les désalignements somatiques statiques et dynamiques que nous avons étudiés.

. Les blocs fonctionnels (284)(285)(115)(394). Deux ou plusieurs vertèbres restent solidaires dans toutes les positions du rachis. On utilise souvent pour les désigner les termes de raideur, d'inversion de courbure. Le terme de bloc fonctionnel indique mieux la persistance d'une anomalie statique en flexion ou en extension ou dans les deux positions. Souvent il existe un double choc sus et sous jacent par rapport à l'interligne qui facilite cette hypermobilité. Lorsque le bloc fonctionnel est unique, l'hypermobilité est sus jacente.

En l'absence de contrôle anatomique on ne peut émettre que des hypothèses sur l'origine de ces lésions:

- . Détérioration discale,
- . Blocage par arrachement d'un ménisque inter apophysaire
- . Elongation ou déchirure des ligaments et des capsules articulaires entraînant des contractures musculaires.

5.5.5.2.4. Les fractures

Ces lésions isolées sont moins fréquentes que les luxations et les fractures-luxations. Il existe :

1. un tassement cunéiforme antérieur de C5 ou de C6 ou de C7, plus rarement de C3 -C4. Il est localisé au plateau vertébral supérieur ou dans certains cas l'atteinte simultanée intéresse les deux plateaux supérieur et inférieur. Ce type de fracture isolée est en principe stable (fig 142).

2. La lésion dite " tear drop fracture " est instable, elle associe (fig 143) :

- . un tassement antérieur du corps vertébral par hyperflexion
- . un fragment antéro-inférieur somatique par hyperextension
- . un recul du mur vertébral postérieur dans le canal rachidien - la vertèbre est un peu basculée en arrière autour de son axe transversal
- . un baillement des articulaires postérieures et de l'espace interépineux.

La tear drop est une fracture instable qui peut s'associer avec un syndrome cordonal antérieur caractérisé par une paralysie motrice complète et une perte de sensation de la douleur et de la température.

3. La fracture par éclatement

Une fracture par compression axiale qui se rencontre de C5 à C7. Il y a impaction du nucleus pulposus dans le corps vertébral, il en résulte un trait vertical ou une fracture comminutive. De face, la distance inter-pédiculaire est augmentée. Le recul du fragment postérieur est parfois responsable de lésions nerveuses. Il s'agit pourtant d'une fracture stable car le ligament longitudinal antérieur et les ligaments interépineux sont intacts, mais le mur de résistance est rompu (340)



Figure 140 : Entorse cervicale (crash) - bloc fonctionnel en flexion.



Figure 141 : Entorse cervicale (crash) - Rectitude en position indifférente.



Figure 142 : Fracture-tassement de C7
Noyau épiphysaire non soudé de l'apophyse épineuse de C7 (parachutisme)



Figure 143 : Tear-drop - Fracture C5
(parachutisme choc en l'air)



Figure 144 : Fracture-luxation C5-C6
(Crash avion léger)



Figure 145 : Fracture des apophyses épineuses de C3, C4, C5, C6.

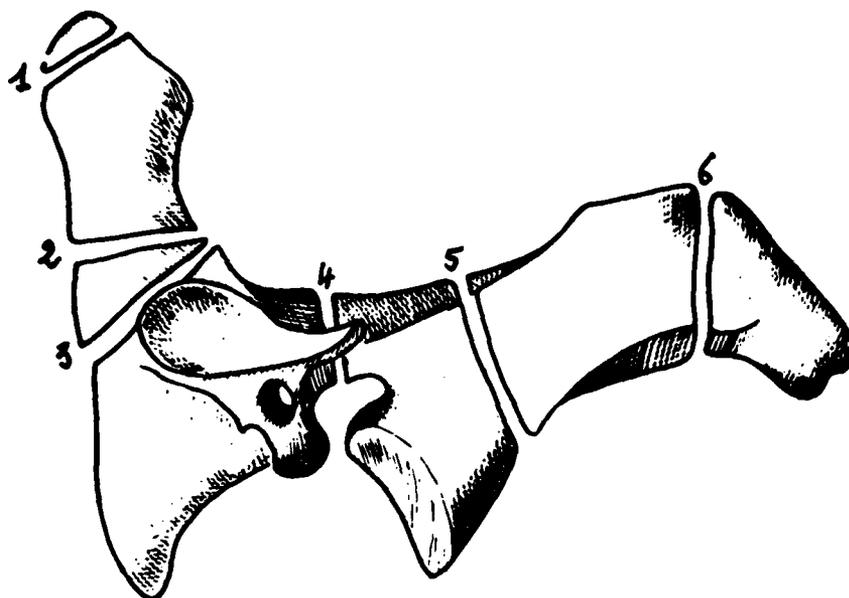


Figure 146 : Fractures de l'axis (d'après A. SICARD)

- 1) pointe odontoïde
- 2) Col
- 3) Base de l'odontoïde
- 4) Pédicule de C2
- 5) Arc postérieur
- 6) Apophyse épineuse



Figure 147 : Fracture de l'apophyse odontoïde.
Chute sur la tête à l'atterrissage
Standard

4. Les fractures comminutives se traduisent sur les radiographies par un morcellement du corps vertébral en plusieurs fragments de taille différente et par des atteintes constantes de l'arc postérieur (fractures instables) (340)(341)(431).

5. Les fractures-luxations (fig 144)

Les fractures-luxations sont les plus fréquentes des lésions traumatiques des cinq dernières cervicales. Ce sont des fractures instables qui sur les radiographies de profil montrent un décalage plus ou moins important de la ligne antérieure, un morcellement du corps vertébral. De face, on observe un décalage prononcé en baïonnette et une augmentation de la distance inter-épineuse. Sur les incidences obliques et les coupes tomographiques, on observe un rétrécissement plus ou moins important d'un trou de conjugaison. Plus le canal est rétréci, moins il y a de chance qu'il s'agisse d'une compression, plus le risque de rupture médullaire est grand (Lavarde) (360 bis). Mais des déplacements peuvent être très importants sans lésion neurologique (399)

6. Localisations particulières (fig 145)

a) Les traumatismes intéressent parfois de façon élective les apophyses épineuses des cinq dernières cervicales. L'atteinte la plus fréquente est C7 et le trait de fracture siège à la base de l'apophyse épineuse qui est souvent détachée du massif vertébral. Il ne faut pas confondre cette atteinte traumatique avec un trouble de l'ossification de l'apophyse épineuse (persistance du cartilage de conjugaison) Dans ce dernier cas, le trait clair séparant l'extrémité de l'apophyse épineuse est large. Les autres vertèbres présentent parfois plusieurs fractures des apophyses épineuses et un déplacement vers le haut n'est pas rare (fig. 145).

b) Les fractures des transverses sont exceptionnelles. La transverse de C7 plus longue que les autres et plus vulnérable est peut être arrachée (257).

c) La fracture-séparation du massif articulaire : elle comporte deux traits, l'un antérieur au niveau du pédicule, l'autre postérieur sur la lame. Le massif articulaire libre bascule parfois vers l'avant. Sur le cliché de face, il existe un trait vertical ou oblique sur une lame et une asymétrie du massif articulaire correspondant.

Sur l'incidence oblique du côté de la lame fracturée est visible un trait sur le pédicule.

De profil, l'un des massifs articulaires présente une bascule par rapport au massif opposé. C'est une fracture instable s'accompagnant, dans plus de la moitié des cas, d'un syndrome neurologique.

Un problème particulier est posé par le tableau d'une tétraplégie post traumatique sans lésion osseuse radiologiquement décelable (327). Celle-ci peut être due à une entorse, à une luxation spontanément réduite, une hernie discale, une lésion vasculaire. Des explorations plus complexes, myélographie, scannographie, discographie, artériographie, sont alors indiquées.

5.5.6. ETUDE RADIOLOGIQUE DES FRACTURES DE C1 et DE C 2

Sommaire particulier

5.5.6.1. FRACTURES DE L'AXIS

1. Fracture de l'odontofide
2. Fracture du corps de l'axis
3. Fractures isolées de l'axis

5.5.6.2. FRACTURES DE L'ATLAS

1. Fracture des masses latérales
2. Fracture isolée de l'arc postérieur de l'atlas
3. Fracture de l'arc antérieur de l'atlas

5.5.6.3. LUXATIONS

5.5.6.4. SUBLUXATIONS TRAUMATIQUES

5.5.6.5. ENTORSES ET TRAUMATISMES MINEURS

Elles représentent 15 à 25% des fractures du rachis cervical et siègent préférentiellement sur l'odontoïde. Il faut être très exigeant sur les critères d'incidences. Le cliché de face ne s'interprète que si l'épineuse de C2 se projette au centre du corps de l'atlas. De profil, à l'état normal, le bord postérieur de l'odontoïde doit être rectiligne dans le prolongement de celui du corps. Par contre, le bord antérieur est oblique. L'espace entre bord antérieur de l'odontoïde et bord postérieur de l'arc antérieur de l'atlas ne doit pas dépasser 3 mm. L'état des parties molles pré-rachidiennes est toujours très important à considérer. Son épaisseur reste inférieure à 3 mm en inspiration en regard de C3.

5.5.6.1. Fractures de l'axis (fig 146)

Elles surviennent lors d'un traumatisme appliqué sur la tête ou la face entraînant une hyperflexion avec antépulsion du rachis cervical (chute d'un lieu élevé, chute d'une charge lourde sur la tête, accidents de la circulation).

La fracture intéresse :

- . l'apophyse odontoïde (pointe, col, base)
- . le corps de l'axis
- . l'arc postérieur.

1. Fracture de l'odontoïde (fig 147 à 150)

La fracture de l'apophyse odontoïde est la plus fréquente, la plus dangereuse et la plus souvent méconnue. Négligée, elle ne consolide pas et le risque de lésion nerveuse persiste (256)(266)(280)(322)(360)(403)(405)(434)(448).

De face, bouche ouverte, les radiographies révèlent l'existence d'un trait de fracture horizontal ou oblique intéressant la base d'implantation de l'apophyse odontoïde. Ce trait généralement possède des contours fins, irréguliers, crénelés bien analysables en tomographie. La projection sur la base de l'odontoïde des bords inférieurs des deux arcs de l'atlas peut prêter à confusion d'où l'importance des tomographies. La luxation ou la subluxation de l'atlas qui n'est plus verrouillée par l'odontoïde s'accompagne d'une rotation modifiant les rapports des articulations atloïdo-axoïdiennes, signe indirect important.

De profil, le cliché bien centré sur C1-C2 précise les déplacements qui accompagnent la fracture de l'apophyse odontoïde restée solidaire de l'arc antérieur. Le trait de fracture moins bien visible sur le profil est facilement analysable sur les tomographies. Il est nécessaire de rechercher les déplacements car les formes associées (luxations et subluxations) sont très fréquentes. Il faut suivre la ligne concave formée en arrière par les points d'implantation des lames à la base des épineuses et correspondant à la limite postérieure du canal rachidien. Si l'alignement a disparu, la vertèbre en regard du décalage a glissé.

La luxation de l'atlas représente la complication la plus courante et la plus dangereuse des fractures de l'odontoïde. La stabilité de l'atlas dépend du ligament transverse qui enserme l'arc antérieur de l'atlas contre l'odontoïde. Si ce ligament est délacéré ou rompu, l'atlas alors peut se déplacer en avant.

Le plus souvent, la luxation de l'atlas est antérieure. Elle entraîne en avant le bloc occipito-atloïdien et expose le traumatisme à de graves complications neurologiques. La moëlle risque d'être étranglée entre l'arc postérieur de l'atlas et le corps de l'axis selon un mécanisme comparé à celui du coupe cigare.

Le cliché et les tomographies de profil montrent :

- la bascule de l'odontoïde par rapport au corps de l'axis,
- son déplacement en avant, le bord postérieur de l'apophyse odontoïde s'alignant à la verticale de la face antérieure de l'atlas,
- la bascule en avant de l'atlas
- la disjonction des épineuses qui sont écartées avec rupture du cintre formé par l'union des lames
- la perte du parallélisme normal entre l'arc postérieur de l'atlas et celui de l'axis. Les deux arcs s'écartent et baillent en arrière.

Plus rarement, la luxation de l'atlas est postérieure. L'odontoïde suit l'atlas lorsqu'il bascule en arrière et les apophyses de l'atlas et de l'axis peuvent venir au contact. Leurs arcs postérieurs se rapprochent. L'odontoïde dans ce cas, menace directement la face antérieure de la moëlle, d'où la plus grande fréquence des complications médullaires immédiates.

Evolution : la fracture de l'apophyse odontoïde évolue spontanément vers la pseudarthrose, sa vascularisation dépend essentiellement du corps de l'axis (fig 151)

Le risque du déplacement secondaire domine toute l'évolution d'une fracture de l'odontoïde et ses conséquences neurologiques. Avec le traitement chirurgical (réduction et immobilisation), on peut espérer la consolidation ou du moins l'apparition d'un cal fibreux suffisamment solide. La radiologie permet d'affirmer et d'apprécier la consolidation et surtout la stabilité. Le contrôle post opératoire comprendra un profil en flexion et un profil en extension.

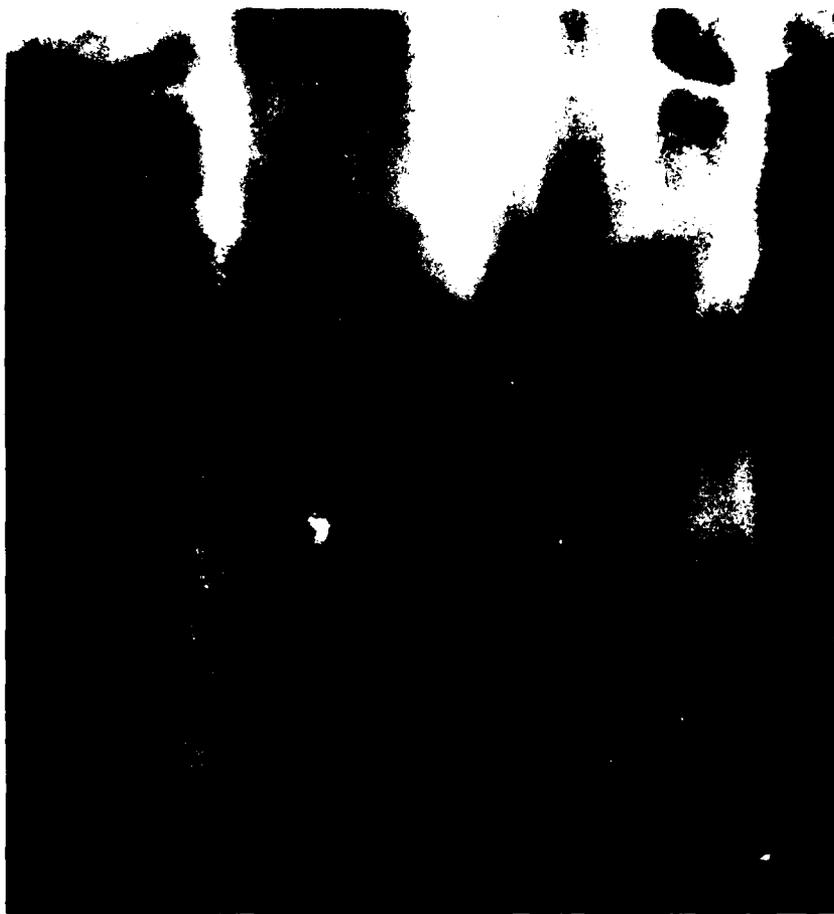


Figure 148 : Fracture de l'apophyse odontoïde.
Chute sur la tête à l'atterrissage.
Tomographie.



Figure 149 : Fracture de l'apophyse odontoïde (crash avion léger)

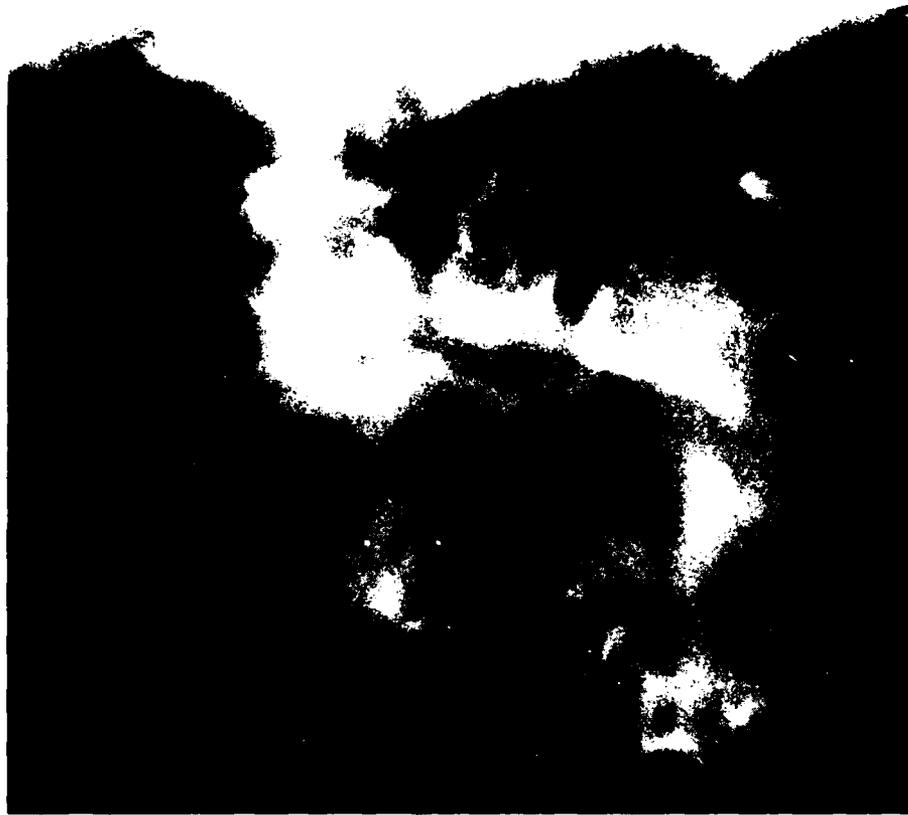


Figure 150 : Fracture de l'apophyse odontoïde



Figure 151 : Pseudarthrose de l'apophyse odontoïde



Figure 152 : Fracture de l'arc postérieur de C2 (parachutisme)



Figure 153 : Fracture de l'arc postérieur de C2 (crash)

Les autres fractures de l'apophyse odontoïde sont plus rares. La fracture de la pointe de l'odontoïde est exceptionnelle. Un trait généralement oblique en bas et en avant isole un fragment osseux de forme arrondie ou ovale. Il importera de le différencier d'une anomalie congénitale. En faveur de la lésion traumatique, on retiendra la finesse du hiatus et ses contours irréguliers crénelés.

La fracture de la base de l'odontoïde qui a servi de type de description (cf. infra) crée parfois un trait de fracture oblique de haut en bas et d'arrière en avant, atteignant le coin antéro-supérieur du corps de l'axis. Dans cette variété, la fracture qui se produit partiellement en tissu spongieux consolide généralement.

2. Fracture du corps de l'axis (293)(360)(424)(448)

Le trait oblique ou vertical passe en arrière de la base de l'odontoïde. Il sépare le tiers ou la moitié antérieure du corps de l'axis dans le sens antéro-postérieur. Ce trait parfois visible sur l'incidence de face n'est parfaitement analysable que sur les tomographies. Il n'y a pas de déplacement et il n'y a pas habituellement de troubles de la consolidation.

3. Fracture de l'arc postérieur de l'axis (259)(293)(424)(426)

G. de Mourgues et L.P. Fischer (455) récemment, ont insisté sur la fréquence de cette lésion encore désignée dans la littérature anglo-saxonne sous le terme de fracture du pendu. La pendaison crée une brusque hyperextension de la colonne cervicale et se produit une fracture de l'arc postérieur de l'axis avec luxation en avant du corps de C2 sur C3. Cette lésion particulière apparaît soit dans les accidents d'automobile, soit dans les accidents de travail (chute d'un échaffaudage). Leur fréquence est certainement plus grande que le fait apparaitre la lecture des différentes statistiques chirurgicales. G. de Mourgues et L.P. Fischer n'en ont-ils pas traité 30 cas récents ?

Les tomographies précisent la topographie du trait de fracture intéressant l'arc postérieur de l'axis et les déplacements éventuels : glissement du corps de l'axis en avant de la troisième vertèbre cervicale.

Ces fractures de l'arc postérieur de l'axis (Hang man's fracture) ont une tendance spontanée à la consolidation si la réduction est bonne et la contention correcte (fig 152 et 153).

5.5.6.2. Les fractures isolées de l'atlas (fig 154)

sont souvent méconnues car difficiles à mettre en évidence sur les radiographies. Presque toujours ces fractures relèvent d'un mécanisme indirect, mais toujours violent, réalisant une hyperextension de la tête. Le diagramme des forces de G. Jefferson explique l'apparition de la fracture séparation où une hyperpression dans le sens vertical, réalisée par un choc violent sur la tête, s'associera avec une hyperextension. Le scanner joue un rôle intéressant dans le diagnostic et le bilan des fractures (347).

Les clichés standards et les tomographies permettent d'individualiser trois types de fractures (293)(423) :

- . les fractures des masses latérales,
- . la fracture isolée de l'arc postérieur,
- . la fracture de l'arc antérieur.

1. Fractures de masses latérales - Fracture de Jefferson (433) (Fig 155)

Le plus souvent bilatérales, elles sont dues à une hyperpression (voir figure d'après G. Jefferson). Cette dernière crée une fracture des masses latérales qui s'écartent l'une de l'autre et qui glissent en dehors si le ligament transverse est rompu ou si l'un des tubercules d'insertion est arraché. Sur les tomographies, il faut rechercher l'excentration des masses latérales s'associant à une perte de contact plus ou moins importante des interlignes atloïdo-axoïdiens. Plus rarement, un fragment osseux se détache d'un bord interne d'une des masses latérales par la contraction du ligament transverse. Ce type de fracture n'entraîne pas de complications médullaires puisqu'il élargit le canal rachidien au lieu de le rétrécir. Il provoque fréquemment des séquelles douloureuses liées à une névralgie du nerf d'Arnold ou à une arthrose atloïdo-axoïdienne.

2. Fracture isolée de l'arc postérieur de l'atlas

Au cours d'un mouvement d'hyperextension, l'arc postérieur de l'atlas coïncé entre deux surfaces osseuses plus résistantes : celle de l'écaïlle de l'occipital en haut, et l'arc postérieur de l'axis en bas, cède en son point faible. Le trait de fracture siège exceptionnellement sur la ligne médiane (à distinguer d'un rachischisis postérieur). Presque toujours situé sur les parties latérales, parfois bilatérales, il intéresse la région se trouvant en arrière des masses latérales. Les tomographies affirment le plus souvent la présence de deux traits souvent symétriques. Le déplacement est nul parce que de puissants éléments musculo-ligamentaires à

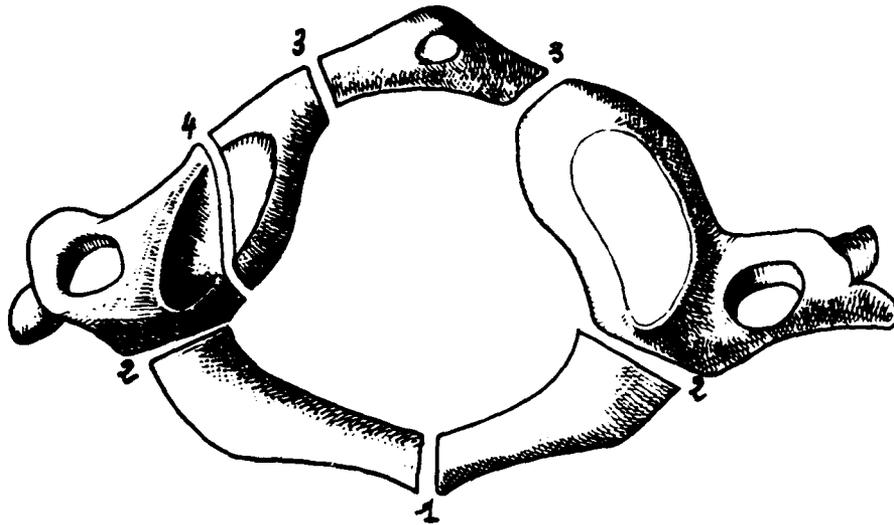


Figure 154 : Fracture de l'atlas d'après A. SICARD

- 1) Fracture médiane de l'arc postérieur
- 2) Fracture de l'arc postérieur
- 3) Fracture de l'arc antérieur
- 4) Fracture des masses latérales.

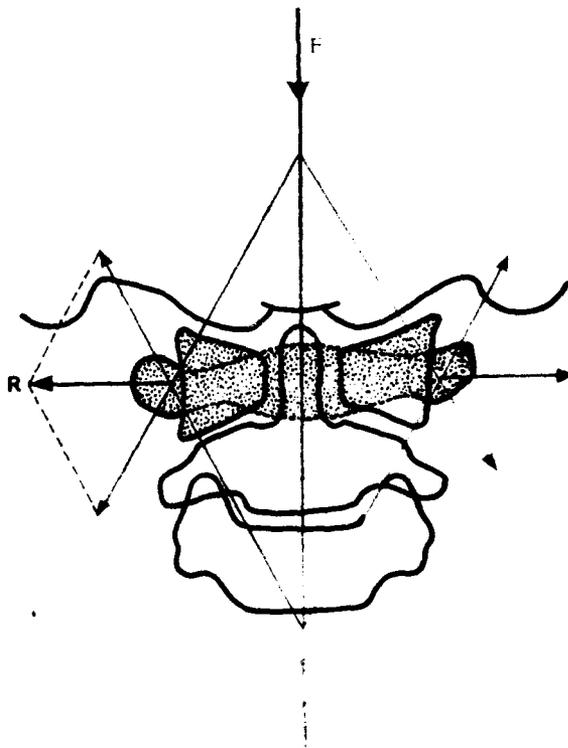


Figure 155 : Schéma de JEFFERSON

La force traumatique (F) transmise à l'atlas par l'intermédiaire des condyles de l'occipital (chute sur la tête) s'oppose à la force (F) dirigée en sens inverse. La résultante (R) de ces forces construites selon la règle du parallélogramme est sensiblement horizontale et tend à chasser les masses latérales en dehors.

A remarquer que la morphologie cunéiforme à base externe et à sommet interne des masses latérales favorise ce développement excentrique.

direction verticale s'y fixent. De plus, il n'y a pas de forces tendant naturellement à chasser le fragment en avant ou en arrière.

3. Fracture de l'arc antérieur de l'atlas

Plus rare que celle de l'arc postérieur, elle est le plus souvent associée à d'autres lésions de l'atlas et surtout à d'autres fractures cervicales. Le déplacement limité, à tendance à se produire en avant sous l'action de la pression de l'odontofide.

5.5.6.3. Les luxations

très rarement isolées, sont le plus souvent associées à des fractures. Il s'agit :

- de luxation occipito-atloïdienne . Exceptionnelle, elle entraîne la mort d'emblée par atteinte du bulbe (mécanisme du coupe cigare) (293)(424)(448).

- de luxation C2,C3 . Cette luxation se produit à la suite d'une fracture de l'arc postérieur de C2 au niveau des pédicules. L'axis glisse en avant sur C3 entraînant avec lui l'atlas et l'occipital.

- de luxation atloïdo-axoïdienne . Pratiquement toujours associée à une fracture de l'apophyse odontofide, elle s'effectue dans trois directions, antérieure (le plus souvent), postérieure, latérale (293)(314).

L'incidence de profil précise le degré de glissement. La luxation atloïdo-axoïdienne survient parfois sans fracture de l'odontofide par rupture ou désinsertion traumatique du ligament transverse.

Sur le profil strict, on appréciera l'écart existant entre l'arc antérieur de l'atlas et de l'axis. Cet écart varie de 2 mm chez l'adulte à 5 mm chez l'enfant.

Notons que cette luxation survient parfois spontanément ou à l'issue d'un traumatisme dans certains processus infectieux (torticollis de Grisel) (localisations hautes de la polyarthrite rhumatoïde, de la spondylarthrite ankylosante).

5.5.6.4. Subluxations traumatiques (Fig 156 à 158)

Particulièrement étudiées par A. Wackenheim, il s'agit de perturbations des rapports entre occiput atlas et axis par rapport à la ligne médiane représentée pour le versant crânien par la ligne intervestibulaire et par la bissectrice de l'angle condylien. Il faut avec cet auteur disposer d'excellents tomodogrammes passant par les deux clartés utriculo-sacculaires et veiller à une bonne application des épaules. En effet, du fait de l'obliquité des surfaces articulaires, une simple rotation peut créer des images semblables aux aspects pathologiques :

- . léger décalage des surfaces articulaires par rotation de l'axis sur l'atlas,
- . l'odontofide n'est plus accolé à l'arc antérieur de l'atlas (cliché de profil).

Les épreuves radiodynamiques en flexion latérale présentent un grand intérêt dans le diagnostic de ces formes qu'il faudra différencier d'asymétries congénitales.

5.5.6.5. Entorses et traumatismes mineurs

Grâce à l'étude radiodynamique, on recherchera au niveau de C1.C2 les désalignements somatiques, statiques et dynamiques et les blocs fonctionnels. Deux ou plusieurs vertèbres restent solidaires dans toutes les positions du rachis. On distingue :

- . un bloc occipito-atloïdien qui serait dû à une déchirure du ligament atloïdo-axoïdien postérieur,
- . un bloc atloïdo-axoïdien en rapport probable avec une déchirure du ligament occipito-atloïdien postérieur.

Ces blocs entraînent une hypermobilité sous jacente de compensation en C2.C3.



Figure 156 : Bloc fonctionnel occiput-atlas avec hypermobilité sus-jacente
(d'après A. WACKENHEIM)

- a) extension
- b) neutre
- c) flexion

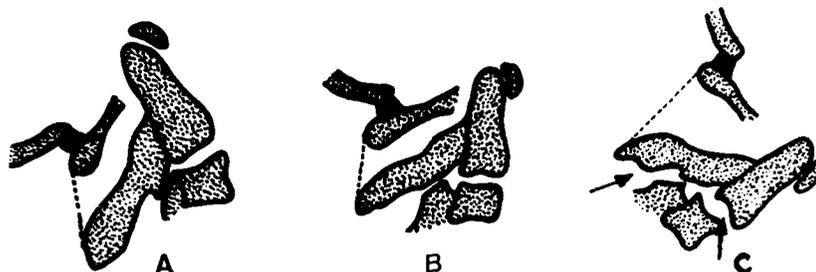


Figure 157 : Bloc fonctionnel C1-C2 avec hypermobilité sus-jacente
(d'après A. WACKENHEIM)

- a) extension
- b) neutre
- c) flexion

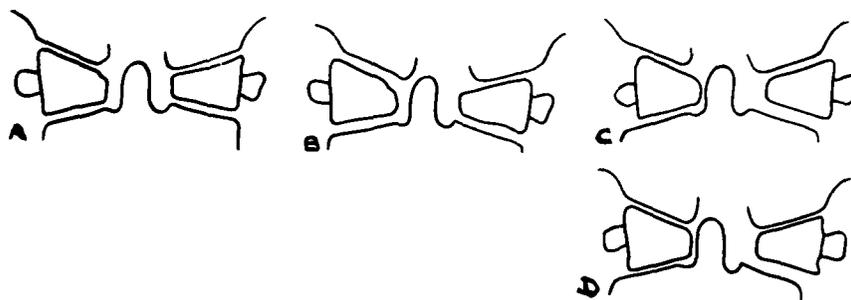


Figure 158 : Dislocation transversale de la barrière cervico-occipitale
(d'après A. WACKENHEIM)

- a) aspect normal
- b) subluxation condylienne
- c) subluxation atloïdienne
- d) subluxation condylo-atloïdienne

5.6. SEQUELLES DES FRACTURES ET DES TRAUMATISMES VERTEBRAUX

R.P. DELAHAYE et P.J. METGES

S O M M A I R E**5.6.1. PRINCIPES THERAPEUTIQUES****5.6.2. ETUDE CLINIQUE**

5.6.2.1. Blessés dont la fracture est restée ignorée

5.6.2.2. Blessés reconnus et traités mais présentant un syndrome douloureux tardif

5.6.2.3. Blessés, dont le bilan clinique et radiologique immédiat a été négatif, se plaignant d'un syndrome douloureux

5.6.3. EVOLUTION ANATOMOPATHOLOGIQUE DU FOYER DE FRACTURE

5.6.3.1. Evolution précoce

5.6.3.2. Evolution tardive

1. Le foyer osseux

. Syndrome de Kummel-Verneuil

2. Les disques

5.6.4. LES ASPECTS RADIOLOGIQUES DES SEQUELLES

5.6.4.1. Au niveau des foyers osseux

5.6.4.2. Au niveau du disque et du tissu péri-discal

5.6.4.3. Déplacements vertébraux

5.6.5. LES SEQUELLES DES LESIONS LIGAMENTAIRES.

5.6.1. PRINCIPES THERAPEUTIQUES

La plupart du temps après l'accident, l'éjection, les pilotes, les parachutistes sont examinés par un médecin de l'aéronautique et dirigés, le plus souvent, vers un centre hospitalier. Là, les blessés sont examinés cliniquement, radiologiquement, puis traités, le cas échéant, dans un service de chirurgie orthopédique. Souvent, les constatations initiales sont le fait du flight surgeon qui participe dans de nombreuses armées de l' Air, de Terre (Parachutisme, Aviation Légère), de Mer (Avion embarqué) aux Commissions d' Enquête. Ces données cliniques, recueillies à chaud, sont souvent très importantes.

Les grands principes thérapeutiques des traumatismes et des fractures du rachis en médecine aéronautique ne sont pas différents de ceux suivis dans la pratique courante, par exemple, après les accidents du travail, de la route, de la pratique sportive. Nous donnons un schéma général correspondant aux différentes tendances des diverses Ecoles de chirurgie orthopédique, en opposant les fractures du rachis dorso-lombaires, les plus fréquentes, aux fractures du rachis cervical plus graves.

5.6.1.1. Fractures du rachis dorso-lombaire

Simple fracture par compression :

- repos strict sur plan dur - immédiatement ;
- rééducation précoce dans la mesure où il s'agit d'une fracture stable et non compliquée ;
- la douleur ne semble pas une contre-indication à la rééducation
- lever au bout de trois semaines.

Fracture avec énucléation :

- repos au lit 4 à 6 semaines
- rééducation commencée tardivement car ce type de fracture est plus douloureux (en moyenne à partir de la 3^{ème} - 4^{ème} semaine)

Fracture complexe :

- Les complications neurologiques, si elles ne régressent pas dans la première heure, sont souvent définitives. Cependant, le traitement chirurgical s'impose pour stabiliser les fractures et permettre un nursing plus facile.

Quand il n'existe pas de complications neurologiques, la stabilisation du foyer de fracture par des moyens orthopédiques ou chirurgicaux (ostéosynthèse en particulier) s'impose. La technique utilisée dépend du type de lésions.

Fractures multiples :

Elles peuvent surtout au niveau de la colonne dorsale, par des tassements importants, modifier profondément la statique sagittale et exiger, après un repos sur un plan dur de durée variable (3 à 6 semaines), une rééducation longue.

5.6.1.2. Fractures du rachis cervical

Tout le pronostic dépend de l'existence des atteintes neurologiques et également de la valeur et de la crédibilité du bilan radiologique précoce. La plupart du temps, il s'agit de fractures instables et le traitement chirurgical s'impose soit par la réduction orthopédique et la minerve plâtrée avec extension par étriers soit par ostéosynthèse.

5.6.1.3. La durée des indisponibilités

Vue la variété extrême des différents types de fractures de la colonne vertébrale rencontrées en pratique aéronautique, est difficile à préciser avec certitude. D'emblée, les fractures instables, heureusement plus rares, s'accompagnent le plus souvent de durée d'indisponibilité très longue et entraîneront malheureusement le plus souvent, des décisions d'inaptitude définitive à tout emploi du personnel navigant.

5.6.2. ETUDE CLINIQUE DES SEQUELLES DES TRAUMATISMES DU RACHIS

Nous devons distinguer trois catégories de blessés :

- blessés dont la fracture est restée ignorée ;
- blessés reconnus et traités présentant un syndrome douloureux tardif,
- blessés dont le bilan clinique et radiologique immédiat a été négatif, se plaignant d'un syndrome douloureux tardif.

5.6.2.1. Blessés dont la fracture est restée ignorée

Le plus souvent, la fracture reste méconnue par absence d'examen radiologique ce qui justifie

- la pratique systématique des radiographies de l'ensemble de la colonne vertébrale chez les pilotes et les parachutistes accidentés.

Dans de nombreuses Armées de l' Air, ces examens radiologiques sont obligatoires.

Quand on connaît la latence clinique de certains tassements vertébraux et qu'on attache une importance fondamentale aux comparaisons des examens à l'admission au personnel navigant et après accident, nous ne pouvons que nous féliciter d'appliquer un régime qui s'avère bénéfique pour le blessé et l'armée de l'air.

Corrélativement, nous utiliserons une technique radiologique irréprochable avec recours très fréquent à la tomographie.

Clinique

Secondairement, apparaissent des douleurs qui sont la plupart du temps localisées à une région précise, réveillées par la station debout, la fatigue ou lors d'un effort en position penchée en avant. Ces douleurs prennent parfois un caractère paroxystique avec des irradiations radiculaires (9)(354)(356). Les masses musculaires latéro-vertébrales sont hypotrophiées, hypotoniques. La mobilité du segment rachidien est diminuée. L'apophyse épineuse est parfois un peu douloureuse à la palpation.

Les radiographies standards et les tomographies révèlent l'existence de signes de fractures : tassement cunéiforme antérieur ou atteintes d'apophyses transverses.

5.6.2.2. Blessés reconnus et traités présentant un syndrome douloureux tardif (354)(356).

Le pilote, le parachutiste, consultent pour des douleurs vertébrales apparaissant après un accident avec un délai variant de quelques semaines à plusieurs années. L'origine de ces phénomènes douloureux doit être recherchée dans la persistance d'une insuffisance musculaire et ligamentaire, en raison de la rééducation fonctionnelle incomplète du blessé qui n'a pas toujours compris la nécessité de ce traitement. Beaucoup de personnel navigant, de parachutistes ne pensent qu'à reprendre leur activité aéronautique et malgré tous les conseils, les avertissements donnés, sont peu réceptifs. Enfin, d'autres reprennent le service aérien apparemment guéris, ne souffrant plus et sont victimes de traumatismes plus ou moins violents (accidents de la voie publique, atterrissages difficiles en parachutes sur des sols accidentés) ou d'un réveil douloureux après une séance d'acrobatie en avion de chasse ou un vol en hélicoptère de durée assez longue.

5.6.2.3. Blessés dont le bilan clinique et radiologique immédiat a été négatif, se plaignant d'un syndrome douloureux.

L'examen radiologique le plus complet, y compris des épreuves radiodynamiques et des tomographies, ne retrouve pratiquement aucune lésion chez un pilote, un parachutiste qui a subi quelques semaines ou quelques mois auparavant un traumatisme du rachis cervical.

Le blessé se plaint de symptômes divers formant un tableau clinique assez caractéristique groupé sous le nom de SYNDROME CERVICAL TRAUMATIQUE qui comprend (296)(303)(419)(444) :

- des céphalées
- des douleurs cervicales
- des signes otovestibulaires
- des signes oculaires
- des troubles psychiques.

1. Les céphalées sont les plus fréquentes. Il s'agit de douleurs paroxystiques, volontiers unilatérales, siégeant dans la région occipitale et irradiant vers la région pariéto-frontale, se déclenchant parfois de façon mécanique. Elles peuvent s'accompagner de troubles sensitifs (hypo ou hyperesthésie) (Delrieu 296)

2. Des douleurs cervicales, volontiers nocturnes, souvent unilatérales servant de point de départ aux hémicranies, sont parfois déclenchées par des mouvements ou le maintien d'une position du rachis cervical. Ces cervicalgies irradient parfois vers les membres supérieurs mais ces irradiations prennent rarement la topographie caractéristique de l'une ou l'autre paire cervicale. Parfois, plus rarement, il s'agit de névralgies cervico-brachiales ou de névralgies cervico-occipitales. Ces dernières unilatérales à irradiation temporales et sous orbitaires, s'accompagnent de lacrymation et de paresthésies du cuir chevelu.

3. Les troubles otovestibulaires

Les troubles de l'audition consistent essentiellement en ACOUPHENES divers :

- bourdonnements, bruits de sifflet, de pluie tombante, sensation d'oreille bouchée. Fréquemment unilatéraux, ces acouphènes s'accompagnent très rarement d'altérations des examens audiométriques.
- Les troubles d'origine vestibulaire sont les vertiges :
 - . soit véritables vertiges rotatoires,
 - . soit simple sensation d'instabilité et d'insécurité passagères souvent déclenchées par une position particulière de la tête.

Nous avons rencontré deux fois (une fois chez un parachutiste professionnel et une

fois chez une hôtesse de l'air) un nyctagmus spontané.

4. Les troubles psychiques, même en milieu aéronautique, s'observent sous forme de manifestations anxieuses, dépressives, de troubles du sommeil, de l'attention volontaire, de la mémoire de fixation (303)(444).

L'examen clinique révèle habituellement une limitation douloureuse, rarement élective, prédominant volontiers sur les rotations. La douleur aux mouvements extrêmes est quasi constante où deux régions sont électivement douloureuses : la charnière cervico-dorsale et la région cervico-occipitale.

Pathogénie

Ce syndrome doit être assimilé au syndrome de Barré et Lieou : Il serait dû alors à une vaso constriction du système artériel vertébral par l'intermédiaire d'une compression du sympathique cervical postérieur (296)(303)(419)

5.6.3. EVOLUTION ANATOMOPATHOLOGIQUE DU FOYER DE FRACTURE (293)(358)(448)

Son étude permet de comprendre la formation des différentes images radiologiques du foyer de fracture et leur évolution. L'opposition entre formes stables et formes instables montre, la valeur de cette classification.

5.6.3.1. Evolution précoce

Dans les formes stables, le tassement des corps vertébraux atteint d'emblée son maximum. Il n'existe aucun risque d'aggravation. La mobilisation précoce est possible.

Dans les formes instables, les déplacements secondaires favorisés par l'importance et la gravité des lésions osseuses, ligamentaires, discales, restent possibles au moindre mouvement du blessé (transport, examens radiologiques sur la table ou même simplement au lit). L'immobilisation sera stricte jusqu'au début de fixation de la lésion. Le cal osseux ou fibreux ou la simple fibrose des parties molles apparaissent dans un délai variant de 1 à 3 mois.

5.6.3.2. Evolution tardive (293)(448)

1. Le foyer osseux :

La réparation des fractures vertébrales serait double :

- formation d'un cal au niveau du tissu spongieux détruit,
- réparation par cal périostique. Ce phénomène, moins marqué que dans les fractures des os longs, ne semble pas admis par tous les auteurs.

Cette consolidation se traduit, sur les radiographies, par l'apparition de petits fragments calcifiés, détachés du ligament antérieur et par la formation d'ostéophytes en bordure.

Le syndrome de Kummel-Verneuil, ce qu'il faut en penser en 1980 ? (279)(297)(357)(372).

KUMMEL (1891), puis VERNEUIL (1892) avant la découverte des rayons X, décrivent un syndrome caractérisé par une évolution en trois étapes :

- un traumatisme initial avec signes cliniques atténués et transitoires ;
- un intervalle libre ;
- l'apparition secondaire d'une gibbosité avec reprise des douleurs.

Kummel et Verneuil rapportaient ce tableau clinique à un tassement vertébral secondaire dû à une ostéoporose post traumatique.

Cet affaissement secondaire du corps vertébral a été maintes fois rapporté. L'absence d'examens radiologiques pratiqués immédiatement après le traumatisme (24 à 72 Heures) ne permet pas de retenir une seule observation indiscutable de tassement progressif et secondaire.

H. Mangin, R.P. Delahaye et R. Buchet (372) revoient à distance 102 dossiers de traumatismes du rachis survenus au cours d'accidents aériens (1951-1961 inclus). Ils comparent les résultats des radiographies pratiquées dans les 24 heures qui suivent l'accident et celles réalisées ultérieurement en 1962.1963. Il existait 16 fractures tassements et 86 traumatismes sans lésion primitivement décelable. Il n'a pas été observé de tassement vertébral tardif aux divers contrôles radiologiques. Les techniques utilisées (standards et tomographies) sont très fiables.

Actuellement, la plupart des chirurgiens orthopédistes, les rhumatologues, les radiologues, s'intéressant à la traumatologie et ses séquelles, estiment que le tassement vertébral post traumatique tardif, base anatomique du syndrome de KUMMEL-VERNEUIL n'existe pas.

L'examen radiologique du rachis doit être pratiqué après tout accident aérien le plus tôt possible et sa technique parfaite.

2. Les disques (fig 163)

Un disque intervertébral lésé ne récupère pratiquement jamais sa structure primitive. En perdant son élasticité, il cesse de jouer le rôle d'amortisseur hydraulique des mouvements du rachis. La calcification post traumatique du nucleus pulposus est exceptionnelle. Au contraire, au lieu de se densifier et de s'unifier, le disque se déforme. Il peut permettre aux corps vertébraux de se déplacer l'un par rapport à l'autre (exemple : bloc fonctionnel à la colonne vertébrale). Exceptionnellement, il dégénère et disparaît totalement (bloc traumatique).

5.6.4. LES ASPECTS RADIOLOGIQUES DES SEQUELLES (274)(293)(318)

Rappelons qu'il n'y a pas de parallélisme entre l'acuité du tableau clinique et l'importance des constatations radiologiques.

5.6.4.1. Au niveau des foyers osseux

Les tassements cunéiformes persistent. L'évolution morphologique est variée. Souvent, il existe une condensation discrète localisée au plateau supérieur de la vertèbre fracturée mais la régularité des contours est conservée. C'est la réassimilation. Le coin peut rester proéminent : il continue à " baver ". (fig 159 et 160) Exceptionnellement, le coin antérieur peut être réassimilé et le corps vertébral récupère une morphologie entièrement normale. Les espaces intervertébraux sus et sous jacents à la fracture vertébrale conservent fréquemment une hauteur normale.

- Dans les fractures complexes avec pratiquement toujours une atteinte du mur postérieur, les déformations vertébrales sont très importantes. Le corps vertébral tassé est élargi dans le sens antéro-postérieur (fig 161, 162 et 164). Le coin antérieur se ressoude et se forme une console régulière dans laquelle il est parfois possible d'observer une empreinte due à des débris nucléaires. Les hiatus s'estompent mais persiste un aspect en ligne brisée du plateau vertébral supérieur (fig 163). Dans certains cas, le corps vertébral s'élargit latéralement avec une discrète condensation du plateau vertébral supérieur. Dans les tassements importants apparaît un bloc généralement incomplet où persiste l'image plus ou moins complète du disque intervertébral. L'ostéophytose marginale très précoce traduit l'importance de l'atteinte discale (fig 166).

Les fractures de l'arc postérieur consolident avec parfois d'épais cals osseux. Par contre, celles de l'apophyse épineuse et des apophyses transverses évoluent fréquemment vers la pseudarthrose.

Les fractures des apophyses transverses consolident normalement ou évoluent vers la pseudarthrose si le hiatus fracturaire à plus d'un centimètre de large ou s'il existe déjà un important déplacement.

L'absence de consolidation se manifeste radiologiquement par la persistance d'un ou de plusieurs traits de fracture. Habituelle à la base de l'apophyse odontoïde, elle est fréquente au niveau des épineuses, des transverses.

5.6.4.2. Au niveau du disque et du tissu péri-discal

En fonction de l'évolution anatomo-pathologique, nous distinguons :

- des pincements ou des baillements électifs des disques qui tendent à rendre au rachis sa rectitude ;
- des calcifications péri-discales sous forme d'ostéophytose marginale ou de synostose extra discale.

L'ostéophytose marginale se présente sous forme d'une prolifération dense des bords et des angles vertébraux en regard de la vertèbre lésée. Le plus souvent, la vertèbre sus jacente forme console d'appui (Fig 163 et 166).

La synostose extra-discale apparaît en avant du corps vertébral ou latéralement sous forme de pont osseux enjambant le disque et fusionnant 2-3 vertèbres. Des aspects de syndesmophytes ne sont pas exceptionnels. Ces phénomènes s'observent parfois en l'absence de toute modification de hauteur des espaces intervertébraux. Le rôle des hémorragies intéressant en particulier l'espace péri-discal est à retenir dans la genèse de ces synostoses (Fig 165). Plus rare est la disparition partielle ou très rarement complète du disque entraînant la création d'un bloc vertébral.

5.6.4.3. Les déplacements vertébraux

Lorsque le traitement chirurgical a été correct, ces déplacements demeurent exceptionnels. Dans certains cas, surtout au niveau du rachis cervical, il peut persister soit des blocs fonctionnels, soit des images de rétrolisthésis dues à des fractures négligées des articulaires.



Figure 159 : Crash - Fractures de L1, L2, L3, L4 - aspect un mois après l'accident.



Figure 160 : Aspects séquellaires de fractures de D6, D7 (éjections)

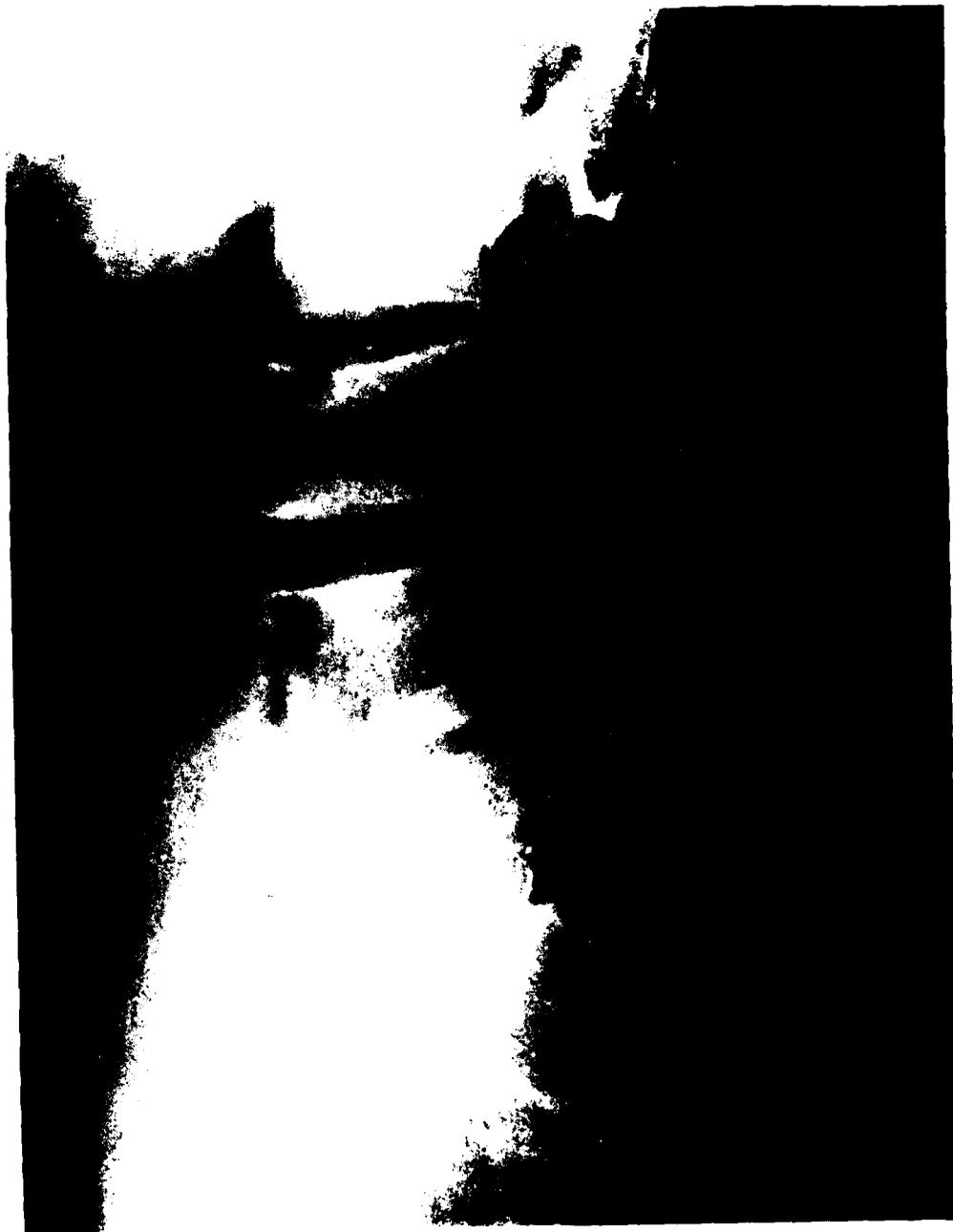


Figure 161 : Accident d'hélicoptère 2 ans auparavant,
séquelles de fractures de L3 et de L5.



Figure 162 : Séquelles de fracture de L2 caractérisées par un tassement cunéiforme de L2 avec encoche du plateau vertébral supérieur et du bord latéral (crash)



Figure 163 : Accident de parachutisme. Séquelles de fracture de L1 avec tassement cunéiforme et pincement D2, L1



Figure 164 : Séquelles de fracture sagittale de L3
(accident d'hélicoptère deux ans auparavant)



Figure 165 : Séquelles de crash datant de 5 ans, calcifications ligamentaires.

5.6.5. SEQUELLES DES LESIONS LIGAMENTAIRES

Le plus souvent, il s'agit d'une non consolidation des ligaments inter-épineux. L'apparition de douleurs tardives est fréquente dans l'évolution des fractures du rachis. Les modifications statiques aggravées par l'insuffisance musculaire des haubans expliquent plus la persistance des algies que l'apparition d'une arthrose.



Figure 166 : Séquelles de fracture comminutive de D6
(4 ans après une éjection)

CHAPITRE 6 : LES AFFECTIONS DE POSTURE EN MEDECINE AERONAUTIQUE

Dans ce chapitre, nous étudierons successivement les algies vertébrales des pilotes d'hélicoptères et les problèmes cervicaux posés par le pilotage des avions militaires de combat.

Le pilotage des hélicoptères entraîne, dans certaines conditions, l'apparition de douleurs rachidiennes. Leur mécanisme physiopathogénique ces dernières années, a fait l'objet de très nombreux travaux. Il ressort que la position du pilote et les vibrations jouent un rôle très important dans la genèse de ces douleurs.

La colonne cervicale des pilotes d'avions de combat est-elle plus souvent lésée que celle des autres pilotes ou de population témoin non soumise aux risques ?

6.1. LES DOULEURS VERTEBRALES DES PILOTES D'HELICOPTERE

R.P. DELAHAYE, R. AUFFRET, P.J. METGES, J.L. POIRIER et B. VETTES

SOMMAIRE

- 6.1.1. Introduction
- 6.1.2. Etude clinique des algies vertébrales des pilotes d'hélicoptère
 - 6.1.2.1. Les lombalgies
 1. Fréquence
 2. Circonstances d'apparition
 3. Formes cliniques
 - 6.1.2.2. Les dorsalgies
 - 6.1.2.3. Les cervicalgies
- 6.1.3. Etude radiologique des algies vertébrales des pilotes d'hélicoptère
 - 6.1.3.1. Colonne lombaire
 - 6.1.3.2. Colonne dorsale
 - 6.1.3.3. Colonne cervicale
- 6.1.4. Evolution des algies vertébrales des pilotes d'hélicoptère
 - 6.1.4.1. Rythme de vol
 - 6.1.4.2. Type de mission
- 6.1.5. Physiopathogénie
 - 6.1.5.1. Le facteur postural
 1. Membres inférieurs
 2. Membres supérieurs
 3. Rachis
 4. Conséquences de cette attitude vicieuse
 5. Angles de confort
 6. Rôle des muscles périrachidiens et de l'ensemble discovertébral
 - 6.1.5.2. Les vibrations (généralités)
- 6.1.6. Origine des vibrations des hélicoptères
 - 6.1.6.1. Généralités
 - 6.1.6.2. Les vibrations d'origine mécanique
 1. Fonctionnement du rotor en vol stationnaire
 2. Rotor en vol de transition
 3. Rotor principal
 4. Rotor anticouple
 5. Autres sources de vibrations
 - 6.1.6.3. Les vibrations d'origine aéronautique
 - 6.1.6.4. Caractérisation des vibrations et mesures d'accélération
 - 6.1.6.5. Evaluation du niveau vibratoire par appréciation subjective
- 6.1.7. Résultats des mesures de vibrations des hélicoptères
 - 6.1.7.1. Effets physiologiques des vibrations
 - 6.1.7.2. Mesures sur Super Frelon
 - 6.1.7.3. Mesures sur Puma SA 330
 - 6.1.7.4. Mesures sur Alouette II (1971)
 - 6.1.7.5. Mesures sur Alouette III (1972)
- 6.1.8. Expérimentations avec des coussins de siège
- 6.1.9. Moyens de protection
 - 6.1.9.1. Protection contre les vibrations
 1. Lutte contre les vibrations
 2. Isolement du pilote
 - 6.1.9.2. Améliorations du poste de travail
 1. Le siège
 2. Les commandes et l'habitacle
 - 6.1.9.3. Moyens applicables au niveau du pilote
 1. Augmenter la résistance rachidienne du pilote
 2. Rôle du flight surgeon
 3. Rôle de l'examen radiologique.

6.1.1. INTRODUCTION

Il y a plus de 40 ans que le pilote d'essais Maurice CLAISSE, après un vol d'endurance sur un hélicoptère Bréguet-Dorand, soulignait le caractère désagréable des vibrations se répercutant dans toute la machine : " Secoué sur une monture inconfortable pendant une heure de vol, le pilote se hâte d'atterrir et de rentrer au hangar pour soigner ses courbures " (40)(75)

Malgré les progrès technologiques accomplis depuis le vol du premier gyroplane en 1907, cette remarque rapportée par le vice-amiral JUBELIN reste actuellement valable en grande partie.

La diminution des agressions et des nuisances, l'amélioration de l'hygiène du poste de pilotage n'ont pas suivi le perfectionnement technique des hélicoptères.

Les manifestations pathologiques dominées par la DOULEUR en relation avec le pilotage d'hélicoptère ont été très étudiées depuis 1950 en France, date à laquelle les premiers appareils ont été utilisés dans les formations de l'armée de l'air française.

Parmi les travaux français, nous citerons ceux de MISSENERD et TERNEAU (1957)(171), FABRE et GRABER (1959)(88), MONTAGNARD, SAIS et GUIOT (1962)(174)(175) Sliosberg (1962.1963)(219)(220)(221)(222), RABISCHONG (188)

Depuis 1963, le Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vol de Brétigny (H. SERIS, R. AUFFRET, J.L. POIRIER, B. VETTES) et les services de radiologie des Hôpitaux BEGIN à St Mandé et Dominique LARREY à Versailles (R.P. DELAHAYE, H. MANGIN, G. GUEFFIER, P.J. METGES, C. COLLEAU) se sont intéressés à cette pathologie douloureuse (40)(52)(61)(75)(76)(77)(186)(209)(211)(213).

Si les vibrations ont suscité de très nombreux travaux, les incidences cliniques ont retenu peu de chercheurs ou de cliniciens. Nous citerons VON BECK (20) VON GIERKE (103)(105), GUIGNARD (118)(119)(120), BRAUNHOLER (30), FISCHER (95).

6.1.2. ETUDE CLINIQUE DES ALGIES VERTEBRALES DES PILOTES D'HELICOPTERES

Ces douleurs vertébrales siègent surtout dans la région lombaire mais peuvent intéresser également les régions dorsale et cervicale.

6.1.2.1. Lombalgies

La lombalgie revêt ses deux formes habituelles : aiguë ou chronique, celle-ci alternant le plus souvent dans le temps chez le même sujet.

1. Fréquence : Le tableau 6-1 indique la grande variabilité de la fréquence de ces douleurs lombaires.

ANNEE	AUTEURS	Nombre sujets examinés	Fréquence %	
1957	MISSENERD et GRABER (171)	-	50	FRANCE
1962	MONTAGARD, SAIS et GUIOT(174)(175)		60	(Armées) FRANCE
1963	Sliosberg (220)(221)	128	67	(Armées) FRANCE
1969	STEYVERS (215)		80	BELGIQUE
1973	RABISCHONG-SERIS (188)	52	89	FRANCE (Armées)
1974	COLLEAU (40)	29	60	FRANCE (Aéronav)
1974	RANCE et CHAPPELOW (189)	34	21	G.B.
1974	BRAUNHOLER (30)		66	U.S. Navy
1977	DIETRICHS cité d'après Von BECK (20)		95	R.F.A.
1978	DELAHAYE, AUFFRET (75)	12	66	FRANCE (pi- lote d'essai)
1978	SCHULTE-WINTROP, KNOCHÉ (205)	145	51	R.F.A.
1979	FISCHER et ZITTELSBERGER (95)	221	63	R.F.A.

Tableau 6 - 1

Cette fréquence varie beaucoup avec les époques et les auteurs. Les valeurs élevées nous paraissent très significatives. En France, il s'agit de conditions de travail très particulières de la population étudiée : pilotes en opérations de guerre (Algérie) pilotes d'essais, moniteurs. La grande majorité des pilotes a plus de 1000 heures de vol.

Dans d'autres pays, plusieurs auteurs signalent également l'apparition de douleurs chez de jeunes pilotes. Ainsi, VON GIERKE, KAPLAN, BRAUNHOLER, trouvent 80% de douleurs dans un groupe de 25 jeunes pilotes suivis au début de leur carrière aéronautique (40)

2. Circonstances d'apparition :

Tous les auteurs s'accordent à mettre en évidence un délai d'apparition aux phénomènes douloureux : de 300 heures pour SLIOSBERG (220) (221) et VON GIERKE (40), 500 à 1000 heures pour MONTAGARD et Coll (174)(175) et pour COLLEAU (40).

Ce délai paraît actuellement être plus long (1000 à 1500 heures dans l'étude effectuée sur le personnel du Centre d'Essais en Vol de Brétigny sur Orge (75). Il existe d'importantes variations individuelles. Ce délai d'apparition des douleurs est diminué par la présence de lésions rachidiennes pré-existantes ou d'anomalies congénitales. Par exemple, un pilote porteur d'une anomalie transitionnelle de la charnière lombo-sacrée accuse des lombalgies dès la vingtième heure de vol.

Le rythme de vol joue un rôle d'entretien de la symptomatologie. Les seuils propices à l'apparition des phénomènes douloureux varient mais nous pouvons retenir les valeurs moyennes suivantes :

- 30 à 40 heures de vol par mois ;
- 3 à 4 heures par jour ;
- 1 H 30 de vol à la suite.

3. Symptomatologie

- La lombalgie chronique est la plus fréquente. Son tableau est celui d'une douleur peu intense à type de fatigue, de pesanteur, de gêne, siégeant dans la région lombaire, parfois plus bas située (lombosacralgie). Elle est transversale médiane, prédominant souvent d'un côté, pouvant irradier vers la région fessière, les crêtes iliaques et plus rarement les aines en avant. Cet endolorissement est rythmé par les vols, aggravé par les efforts de soulèvement et les longs trajets en voiture, calmé par le repos en décubitus et les séances de kinésithérapie.

A un degré de plus, cette gêne se transforme en une douleur qui rend le vol très pénible, le pilote cherchant, malgré le maintien constant de la position de ses membres, à changer de posture. Cette douleur augmente d'intensité en fin de journée lors du dernier vol, et devient maximale lorsque le pilote descend de l'appareil. Bien que persistante dans la soirée, elle tend à s'atténuer, mais la station debout la fait réapparaître. Elle disparaît après une nuit de repos.

L'examen met parfois en évidence une discrète attitude antalgique scoliotique avec raideur et une légère contracture paravertébrale ; mais le plus souvent la statique est correcte et l'examen ne révèle que des signes dynamiques : légère diminution de l'indice de Schobert, retard du redressement du segment lombaire.

Enfin, dernier stade, cette douleur pénible devient permanente et rend tout mouvement de flexion du tronc très difficile, voire impossible, ceci pendant la période intensive du vol. A l'examen, le plus souvent, l'hyperextension et la flexion antérieure forcées réveillent la douleur qui limite les mouvements du tronc. Il existe en outre une contracture musculaire péri-vertébrale, avec ou sans inclinaison latérale du tronc. La palpation et la pression montrent que les zones lombaires du muscle des gouttières sont douloureuses. Le signe de Lasègue peut parfois être mis en évidence, toujours unilatéral, avec à la palpation, les classiques points de Valleix, alors que l'examen neurologique est presque toujours normal sur le plan de la motricité, sensibilité et réflexivité.

- Les lombalgies aiguës retrouvées en moyenne dans 50% des cas surviennent pour la plupart sur un fond de lombalgie chronique, de façon isolée.

Leur mode de survenue est variable : on relève souvent un début progressif sans effort initial précis mais après un surmenage inhabituel ou une apparition en deux temps, la douleur ne se manifestant que quelques heures après le vol ; parfois le début est brusque mais l'effort ou le faux-mouvement déclenchant sont alors indépendants de la pratique aéronautique (jardinage, sports, etc ...).

Ces lombalgies aiguës revêtent le tableau du classique tour de rein constitué par une douleur très vive, intense, réveillée au moindre mouvement, limitant tout déplacement ; cette douleur siège dans la région lombo-sacrée, souvent plus vive d'un côté mais irradiée habituellement à toute la région lombaire et fessière et souvent même dans les cuisses.

L'examen rendu difficile par l'intensité de l'algie révèle des points douloureux latéro-vertébraux à hauteur des derniers disques, la contracture paravertébrale et surtout l'inflexion antalgique cyphoscoliotique qui se maintient identique dans les divers mouvements rachidiens. Il met en outre en évidence un signe de Lasègue lombaire bilatéral.

Sous l'effet du repos en décubitus de préférence sur un plan dur, du traitement antalgique anti-inflammatoire et décontracturant l'évolution est en règle générale favorable en quelques jours mais la lombalgie aiguë se reproduit souvent à intervalles variables sur un fond de douleurs chroniques.

- Enfin la sciaticque (181), complication majeure de la discopathie dégénérative a été retrouvée dans 2 cas dans l'étude (75), frappant les pilotes ayant plus de 4000 heures de vol et souffrant depuis plusieurs années de lombalgies. Sur 128 sujets effectuant un travail intensif, SLIOSBERG (220) en dénombre 11.

L'examen clinique met en évidence l'inflexion antalgique directe ou croisée, les classiques points de VALLEIX et surtout le signe de LASEGUE. La sciaticque affecte indifféremment la racine L5 ou S1, souvent accompagnée alors d'une abolition du réflexe achilléen. On note en général l'absence de signes neurologiques déficitaires importants ; un des deux cas de l'étude (75) s'est cependant manifesté sous forme paralysante de type L5, due à une très volumineuse hernie discale ayant nécessité une intervention.

6.1.2.2. Les dorsalgies

Il s'agit classiquement plus d'une gêne ou d'un endolorissement que d'une véritable douleur, siégeant dans la région moyenne du dos (D6 -D7) et cédant à des mouvements d'extension du tronc, elles sont souvent associées à des douleurs lombaires. SLIOSBERG (220) (221) et COLLEAU (40) en retrouvent environ 40%. Pour notre part (75) nous n'avons dénombré aucune véritable dorsalgie ; cette différence s'explique en partie par l'amélioration de la position de pilotage et du confort dorsal des sièges, mais surtout par le fait que l'étude de COLLEAU concernait des pilotes de l'Aéronavale portant fixé sur le dos un dinghy plié et sa bouteille de gonflage d'un poids total de 8 Kg. Ce harnachement constitue un dossier inconfortable et inadapté aux sièges de série, ces contraintes étant encore accentuées par le port de la Mae-West (40).

6.1.2.3. Les cervicalgies

Dans son enquête (220), SLIOSBERG note que 30% des sujets présentent des douleurs cervicales basses, médianes, pouvant parfois irradier vers l'épaule ou le membre supérieur revêtant alors la forme d'une névralgie cervico-brachiale. Elles sont exceptionnellement isolées, le plus souvent associées à des lombalgies. COLLEAU (40) en retrouve 2 cas (sur 29), interprétant cette diminution par une amélioration de la visibilité aux commandes des appareils modernes.

D'autres pilotes signalent simplement une gêne de la nuque réveillée aux mouvements extrêmes de la tête et aggravée habituellement par le port du casque.

6.1.3. ETUDE RADIOLOGIQUE DES ALGIES VERTEBRALES DES PILOTES D'HELICOPTERE

6.1.3.1. Colonne lombaire

1. MONTAGARD et Coll (175) publient la première enquête radiologique ayant intéressé 60 pilotes (37 moniteurs et 23 élèves). Ils insistent sur les déviations scoliotiques fréquentes (34 cas sur 60, soit 56%) sans déséquilibre pelvien. Certaines sont légères avec une rotation vertébrale minime, d'autres plus prononcées avec rotation vertébrale notable.

Par ailleurs, MONTAGARD et Coll trouvent quatre anomalies transitionnelles de la charnière lombo-sacrée, deux séquelles d'épiphysite de Scheuermann. La confrontation radioclinique est intéressante. Sur les 34 scoliotiques, 13 cas accusent des douleurs vertébrales.

2. Les enquêtes effectuées à l'Hôpital Dominique LARREY par R.P. DELAHAYE, H. SERIS, R. AUFFRET, contenues dans les travaux (52)(211)(213) et la thèse de C. COLLEAU (40) sont différenciantes. Elles intéressent 70 pilotes et mécaniciens d'hélicoptères consultant pour des syndromes douloureux vertébraux.

Dans 30% des cas (21 cas), les radiographies révèlent un aspect radiologique normal. Par contre, dans 60% des cas (42 cas), il existe une attitude scoliotique sans rotation des corps vertébraux généralement centrée sur L1 ou L2 et qui ne s'accompagne pas d'importantes modifications de la morphologie vertébrale. Les épreuves radiodynamiques (clichés en flexion latérale) ne décèlent pas de baillement ou de pincement électif des interlignes.

Dans 10% des cas (7 pilotes), il existe des signes d'arthrose intéressant L4.L5 (ostéophytose marginale antérieure dans 5 cas, ostéophytose postérieure et inférieure de L5) et des séquelles traumatiques (tassement cunéiforme antérieur de L2 dans un cas).

3. De ces deux enquêtes, il est permis d'isoler quelques remarques :

- La fréquence d'une attitude scoliotique, c'est à dire d'une inflexion de la ligne des épineuses sans rotation des corps ou d'une scoliose légère associant inflexion de la ligne épineuse et rotation des corps vertébraux atteint 70% de la population dite normale (voir chapitre 7).

R.P. DELAHAYE, P.J. METGES, G. GUEFFIER, H. MANGIN (56)(58)(289)(290)(291).

Il apparaît que cette modification isolée de la statique dans le plan frontal ne peut être reconnue comme le témoin d'une manifestation pathologique en dehors des cas où il s'agit d'une inflexion d'origine antalgique avec contracture para-vertébrale.

Il est difficile d'affirmer la spécificité de certaines altérations anatomiques vertébrales, l'arthrose en particulier. Cependant le fait de constater des signes d'arthrose de rencontrer des malformations congénitales de la charnière lombo-sacrée, des séquelles de traumatisme correspond bien souvent à un tableau clinique de douleurs généralement intenses pour entraîner des indisponibilités fréquentes.

4. Radiographies sur siège

C. COLLEAU (40) rapporte les résultats d'études effectuées en 1966 par R.P. DELAHAYE et J. SHICKELE qui recherchent les modifications vertébrales créées par la position du pilotage d'hélicoptère. Une maquette d'Alouette II est transportée dans une salle de radiodiagnostic. Les résultats enregistrés, tout en confirmant la valeur des angles de confort de WISNER (246) (247) soulignent que ces déviations s'accroissent parfois en position assise.

Ces modifications de la statique chez les pilotes d'hélicoptère ne peuvent être retenues que si elles s'aggravent progressivement sous l'influence de la position du pilotage ou si elles sont absentes sur les radiographies d'aptitude.

Des études complémentaires sont actuellement en cours.

6.1.3.2. Colonne dorsale

De discrets signes d'arthrose dorsale caractérisés par une ostéophytose marginale antérieure sans modification de la hauteur des interlignes sont trouvés aux examens radiographiques de pilotes généralement âgés de plus de 40 ans. Les rapports avec le pilotage d'hélicoptère ne sont pas évidents et doivent faire l'objet d'études prolongées et étalées dans le temps.

6.1.3.3. Colonne cervicale

Les manifestations radiologiques (ostéophytose marginale antérieure, pincement des interlignes, déformation des apophyses unciformes) apparaissent fréquemment avant 40 ans.

Il est actuellement admis que la cervicarthrose représente une entité anatomoradiologique dont l'apparition peut être précoce et dont l'extrême fréquence au-delà de 40 ans (50% de la population) contraste avec son incidence clinique souvent absente ou tout au moins intermittente. Cependant la présence de signes radiologiques identiques chez tous les pilotes examinés, dont la plupart n'ont pas atteint la quarantaine, doit être notée.

6.1.4. EVOLUTION DES ALGIES VERTEBRALES DES PILOTES D'HELICOPTERE

Elle va dépendre de plusieurs facteurs :

- le rythme de vol,
- le type de mission.

6.1.4.1. Le Médecin P.N. (flight surgeon) veillera à l'évolution du rythme de vol correspondant aux seuils propices d'apparition des symptômes douloureux :

- Plus de 4 à 5 heures de vol par jour,
- Plus de 2 heures de vol à la suite,
- Plus de 40 à 50 heures de vol par mois.

Il existe d'importantes variations qui tiennent à des différences d'âge biologique et au type d'appareil.

6.1.4.2. Le type de MISSION intervient :

SLIOSBERG (220) rapporte le cas de pilotes assurant des héliportages de commandos avec 8 heures de vol dont 50 atterrissages et décollages. Les observations américaines au Viet-Nam insistent sur le rôle de ces atterrissages nombreux dans les zones de combat et également les missions de mitraillage au sol, en vol à très basse altitude, ajoutent de très fortes trépidations aux vibrations de l'hélicoptère.

Les pilotes d'Alouette servant sur les porte-avions pour surveiller le catapultage et l'appontage des avions, accordent la vitesse de l'hélicoptère avec celle du bâtiment qui avance à 20-30 nœuds. Ces vols de Rescue de durée variable, créent des vibrations d'amplitude élevée. Avec l'accumulation de ces vols, le seuil d'apparition des douleurs diminue le plus souvent autour d'une heure de vol. Les exercices d'hélicoptère et de lutte anti sous marine exigent la pratique de vol en stationnaire durant 5 à 25 minutes. Les niveaux vibratoires sont particulièrement importants (C. COLLEAU) (40).

Si les vols fréquents se déroulent dans une période prolongée, les missions RESCUE sont nombreuses dans la croisière d'un porte-avions, les algies vertébrales ne sont plus qu'un des signes du syndrome de fatigue décrit par MISSENARD et TERNEAU (171),

LEROUX (162)(163) chez les pilotes d'hélicoptères. On observe alors des troubles du sommeil, de l'asthénie et des variations de tension artérielle.

Au bout d'un temps prolongé d'exposition, apparaît une véritable affection chronique où les douleurs surviennent plus précocément au cours du vol. Elles persistent alors plus longtemps après la fin du vol. Le repos prolongé, les vacances entraînent une accalmie des phénomènes douloureux, voire leur disparition. Ils réapparaissent souvent après un nouveau vol sur hélicoptère.

La symptomatologie modifie ses caractères (intensité, délai d'apparition) si le pilote change d'appareil. Par exemple, les pilotes signalent un meilleur confort en passant des Alouettes au Super Frelon.

Le cas des pilotes ne doit pas faire oublier celui des autres membres de l'équipage. Soumis aux mêmes vibrations, leurs tâches les amènent souvent à travailler en position assise penchée en avant. Sur Super Frelon, le mécanicien de bord, assis sur une banquette rabattable, souffre parfois de façon assez importante. Le mécanicien sur Alouette est gêné surtout en mission Rescue. L'opérateur SONAR pendant les missions de recherche sous marine, avec stationnaires prolongés, se plaint souvent de douleurs aiguës.

6.1.5. PHYSIOPATHOGENIE

Les douleurs vertébrales des pilotes d'hélicoptère sont dues à l'action synergique de deux facteurs :

- un facteur postural : la mauvaise position du pilotage ;
- un facteur mécanique microtraumatique dû aux vibrations de l'hélicoptère

6.1.5.1. Le facteur postural

Bien décrit par SLIOSBERG (220)(222), ce facteur postural est dû à l'utilisation constante et coordonnée des quatre membres dans le pilotage d'hélicoptère.

- Le membre supérieur droit manoeuvre le manche de pas cyclique responsable du mouvement de translation ;
- le membre supérieur gauche agit sur le levier de pas collectif, réglant la sustentation de l'appareil ;
- les pieds actionnent le palonnier qui par l'intermédiaire du rotor de queue (rotor anticouple) fait pivoter l'hélicoptère et permet de choisir un cap de vol.

La disposition de la commande de pas collectif oblige le pilote à se pencher à gauche tandis que les impératifs du vol à vue nécessitent une flexion du tronc en avant, la tête en hyperextension.

1. Les membres inférieurs

Les pieds reposent sur le palonnier, jambes et cuisses légèrement fléchies. L'appareil ayant tendance à pivoter spontanément sur un côté, la correction effectuée par le rotor anti-couple exige en fait une pression dissymétrique permanente au niveau du palonnier. Parfois le pilote, situé sur le siège droit, peut appuyer son genou gauche sur le pylone des commandes placé entre les deux sièges. Le membre inférieur droit ne s'appuyant sur rien, il en résulte une asymétrie de contraction des deux membres inférieurs, retentissant sur la statique du bassin et par là, au niveau du rachis lombal.

2. Les membres supérieurs

Le membre supérieur droit actionne le manche du pas cyclique situé entre les deux membres inférieurs, le coude étant en flexion presque à angle droit. Sur les appareils actuels, le dessin du manche est calculé de façon à ce que le coude droit puisse reposer et se caler sur la cuisse droite. Sur d'autres appareils (type H34), ce manche est trop haut et souvent le pilote doit le tenir du bout des doigts pour avoir une position confortable. Enfin, le manche est poussé dans le même sens que la direction de vol, donc presque toujours vers l'avant. Ce fait entraîne une projection de l'épaule droite vers l'avant.

La main gauche actionne le levier de pas collectif en demi-flexion, sans exercer d'efforts, la position du levier se calant grâce aux servo-commandes. Cette position néanmoins constante, se caractérise par l'inclinaison et l'effacement de l'épaule gauche vers le bas. Sur les appareils anciens (H 34), la main gauche contrôle une grosse bague (la manette des gaz) d'où les mouvements de prosupination constants. Signalons le handicap subi par les pilotes de petite taille qui règlent leur siège en position haute pour améliorer leur visibilité. De ce fait, la distance les séparant de la commande de pas collectif étant plus grande, l'inclinaison en avant et l'abaissement de l'épaule gauche sont encore plus accusés.

3. Rachis

Théoriquement le rachis dorsal et lombaire devrait être solidaire du dossier du siège par un sanglage type harnais. En pratique, la nécessité de pilotage à vue constant oblige le pilote à ne pas serrer les bretelles de suspension

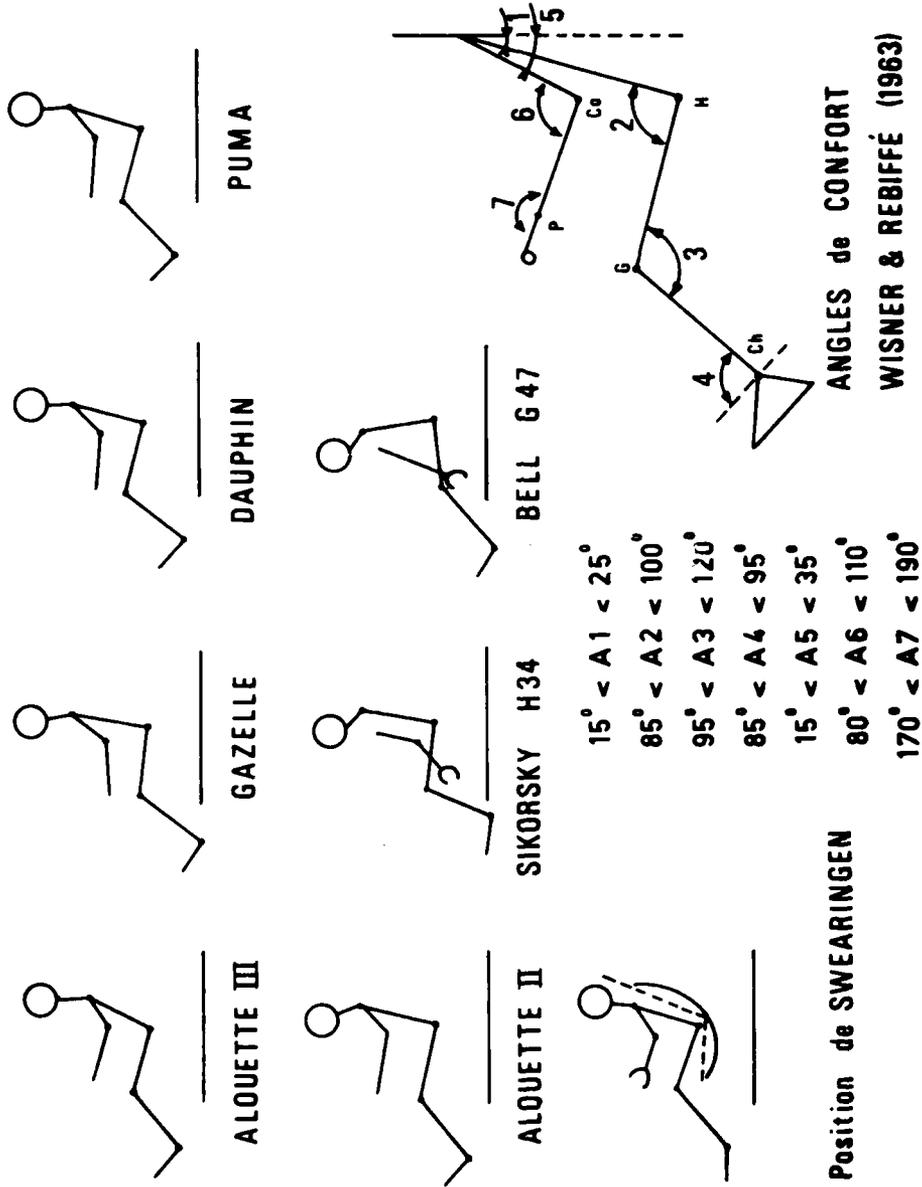


Figure 167 : Angles des différents segments corporels mesurés sur un pilote assis au poste de pilotage de quelques hélicoptères (C.N.V. de Brétigny-sur-Orge)

sur lesquelles, d'ailleurs, il se cale, penché en avant. Le dos s'écarte ainsi du dossier, le rachis cervical se trouve en hyperextension. Cette dernière attitude s'accroît plus ou moins si le tableau de bord de l'appareil remonte assez haut (H 34) ou si la petite taille du pilote l'exige.

4. Conséquences de cette attitude vicieuse

Cette position asymétrique permanente empêche toute relaxation au niveau de la musculature rachidienne. Elle joue un rôle non négligeable dans l'apparition des douleurs vertébrales.

SLIOSBERG (220)(222) retient trois causes à l'origine des douleurs vertébrales :

- permanence de l'attitude ,
- dissymétrie ;
- tension constante des muscles sustentateurs du rachis

a) Permanence de l'attitude

Les quatre membres sont sollicités en permanence pour contrôler à chaque instant toutes les commandes. Les positions de celles-ci peuvent varier selon les phases de vol, mais doivent être maintenues constamment par le pilote, qui est soumis, à une immobilité vigilante. Aucune détente n'est possible, du décollage à l'atterrissage. Cela va à l'encontre de tout confort.

b) La dissymétrie de l'attitude

entraîne une contraction musculaire involontaire de certains segments du membre. Cette contraction est pénible. Le rachis se trouve en position de bascule latérale, attitude tout à fait néfaste qui va le sensibiliser considérablement aux vibrations de l'appareil. Ce phénomène s'exagérera dans les phases d'atterrissage, de décollage, de stationnaire, et aux petites vitesses (petits pas), phases de vol où les niveaux vibratoires sont particulièrement élevés.

c) Tension constante des muscles sustentateurs du rachis

Le dos et les lombes ne s'appuyant pas convenablement sur le dossier du siège, leur soutien est pris en charge par la musculature périrachidienne qui se trouve en état de contraction permanente.

RABISCHONG, H. SERIS et Coll (188) distinguent les postures assises statique et dynamique. Dans le premier cas, le sujet assis recherche un confort de repos. Dans le second, le sujet doit travailler, étant assis sur un siège, ce qui l'amène à des contraintes différentes avec perte de l'appui dorsal et mise en jeu de synergies musculaires de fixation au niveau du rachis et des ceintures, ce qui engendre des fatigues et des phénomènes douloureux (188).

5. Angles de confort (fig. 167)

La position du pilote d'hélicoptère ne répond pas aux critères de confort établis par SWEARINGER et WISNER (246)(247) qui ont défini la valeur des angles devant exister entre les pièces squelettiques adjacentes pour permettre chez un individu assis, un bon relâchement des groupes musculaires antagonistes, traduction physiologique de la notion subjective de confort.

Ces valeurs diffèrent notablement de celles mesurées sur des pilotes surtout d'un appareil de modèle ancien (SIKORSKY H 34 par exemple), sur les modèles plus récents (DAUPHIN, GAZELLE), la position du pilote se rapproche plus de ces angles de confort.

6. Rôle des muscles périrachidiens et de l'ensemble discovertébral

Sur les modèles analogiques décrits par HRAK (122) DIECKMANN (79), COERMANN (38)(39) le corps humain est assimilable à un ensemble de masses suspendues, reliées entre elles par des systèmes de ressorts et d'amortisseurs (disques intervertébraux, ligaments, muscles). Les muscles jouent un rôle d'amortisseurs (Fig. 168 et 169) limitant les mouvements du squelette et protégeant ainsi les disques intervertébraux. Contracturés, leur efficacité va rapidement diminuer avec la fatigue. Cet amortisseur forcé ne jouera plus son rôle protecteur et livrera vertèbres et disques à l'action directement nocive des vibrations.

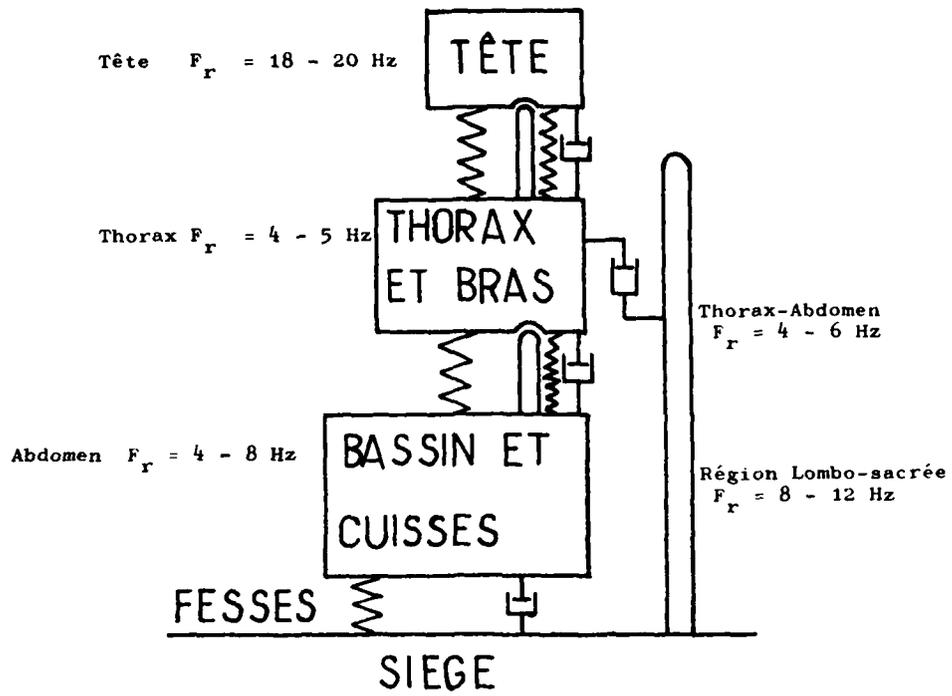
Avec SLIOSBERG (220)(222) deux facteurs importants à l'origine des algies vertébrales doivent être incriminés : un musculaire et un mécanique d'origine discovertébrale.

- Le facteur musculaire -

Dans la statique et la dynamique du rachis, la musculature joue un rôle important de haubannage. Ces haubans permettent l'équilibre du rachis et son mouvement : qu'un muscle vienne à défailir ou au contraire à se contracturer par un travail de tension permanente prolongée, le système se trouve déséquilibré. Les muscles peuvent donc être source de douleurs.

- Le facteur mécanique discovertébral -

J.J. KEEGAN (147) en recherchant les conséquences des modifications de la courbure lombaire en position assise insiste sur le rôle de l'angle tronc-cuisses dans la genèse des algies lombaires. En position assise, la lordose lombaire s'efface



F_r = Fréquence de résonance.

Figure 168 : Modèle mécanique de l'homme assis d'après HAACK (140)

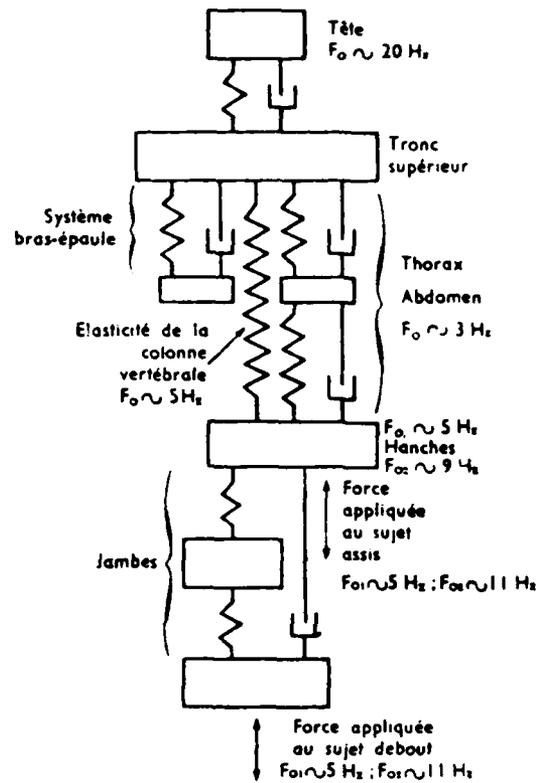


Figure 169 : Modèle analogique de l'homme debout ou assis soumis à des vibrations

Gz \pm . F_0 = fréquence propre d'après COERMANN (38) (39)

les corps vertébraux tendent à se rapprocher en avant et apparaît une augmentation de la pression hydraulique à la partie antérieure des disques intervertébraux. Le nucleus pulposus va vers l'arrière de l'espace intervertébral pouvant irriter l'appareil ligamentaire, voire les racines nerveuses au contact.

L'exemple des pilotes de l'Aéronavale rapporté par C. COLLEAU (40) est particulièrement intéressant.

Ces pilotes, dont la plupart des missions les amène à survoler la mer, portent un équipement de sauvetage constitué d'une Mae-West et d'un dinghy dorsal. Le dinghy en particulier, dégonflé et plié, se présente sous la forme d'un sac à parachute et comme lui se porte sur le dos par des bretelles de suspension. Il pèse 7 à 8 kg. Sur sa partie inférieure, est fixée une bouteille de gonflage au CO₂ qui s'appuie sur la région lombaire du pilote assis aux commandes de son appareil. Le dinghy joue ainsi le rôle d'un dossier très dur, inconfortable. La bouteille de CO₂ et les faux plis éventuels du canot compriment les parties molles et la musculature vertébrales. Cette impression de carcan est encore accentuée par la Mae West pesant 4 Kg.

Pour COLLEAU (40) cet équipement provoque un surcroît de charge au niveau du rachis, et de pression sur les disques intervertébraux. Il entraîne aussi un excès de travail et de tension de la musculature paravertébrale. De plus, les sièges utilisés sur les appareils de série, ne sont pas conçus en fonction de ce harnachement. Le pilote se trouve ainsi en position avancée (épaisseur du dinghy), ce qui réduit d'autant la surface d'appui du coussin offerte au bassin et surtout aux cuisses, qui ne sont pratiquement plus supportées (particulièrement dans le cas des petits sièges de l'Alouette).

6.1.5.2. Les vibrations (généralités)

Résultat du rendement imparfait de tout système mécanique en mouvement, les vibrations représentent, au même titre que la chaleur, une forme dégradée d'énergie que l'opérateur humain récupère directement à son poste de travail sous forme de nuisances. Leur caractère universel et leur importance ergonomique expliquent que de nombreux chercheurs aient essayé d'en déterminer les effets physiologiques et physiopathologiques. COERMANN (38)(39), DIECKMANN (79), WISNER (246) (247) (248), BERTHOZ (24)(25)(26).

Le domaine aéronautique est loin d'être épargné par les agressions vibratoires et en particulier l'hélicoptère qui, parmi tous les moyens de transport utilisés, est de ceux qui engendrent les vibrations de plus haut niveau. D'importants travaux ont été consacrés à la mesure de ces phénomènes et à l'étude de leur action sur le personnel navigant parmi lesquels il faut citer ceux de GOLDMAN (108)(109), Von GIERKE (103) (104)(105), GUIGNARD (118)(119)(120) et en France ceux de H. SERIS, R. AUFFRET et leurs Collaborateurs (207)(208)(209)(210)(211)(212)(213).

Actuellement au Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vol de Brétigny, des essais en cours recherchent les effets biodynamiques et biophysiques de ces vibrations sur l'homme et d'apporter des solutions visant à protéger les pilotes et à améliorer leur confort (POIRIER, AUFFRET) (184)(185)(186).

6.1.6. ORIGINE DES VIBRATIONS DE L'HELICOPTERE

6.1.6.1. Généralités :

Les vibrations enregistrées à bord des hélicoptères sont de deux origines : mécanique d'une part et aérodynamique d'autre part. Elles sont décrites dans le système classique de coordonnées rectangulaires de référence (X, Y, Z) relié au squelette humain.

6.1.6.2. Les vibrations d'origine mécanique :

Incomparable pour assurer le vol stationnaire, le rotor de l'hélicoptère a le défaut de créer, en particulier en vol de translation, une ambiance vibratoire importante. Ces vibrations ont de multiples effets sur la tenue de nombreux éléments et équipements de l'hélicoptère.

Nous envisagerons successivement le fonctionnement du rotor en vol stationnaire, en vol de translation, puis les vibrations engendrées par le rotor principal et le rotor anticouple.

1. Fonctionnement du rotor en vol stationnaire (J. RICHARD)(192) (figures 170 à 175)

L'hélicoptère est en vol stationnaire lorsque la portance du rotor équilibre le poids de l'appareil. La portance est créée par la différence de pression entre les deux faces du disque rotor :

$$F_n = S (P_2 - P_1)$$

La portance du rotor est aussi la somme des forces de portance de tous les éléments des pales. Chaque élément de pale est un profil d'aile animé d'une vitesse uniforme U, proportionnelle à la vitesse de rotation ω du rotor et à la distance d de l'élément au centre du noyau : $U = \omega \times d$ (fig 170)

Le pas est le calage d'un élément de profil par rapport au plan

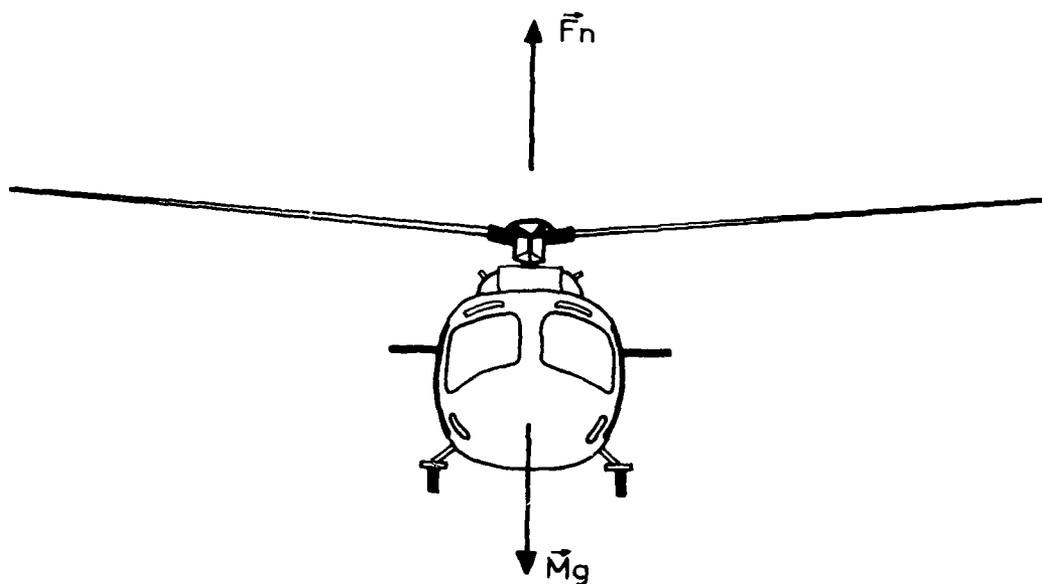


Figure 170 : Hélicoptère en vol stationnaire (d'après J.RICHARD)

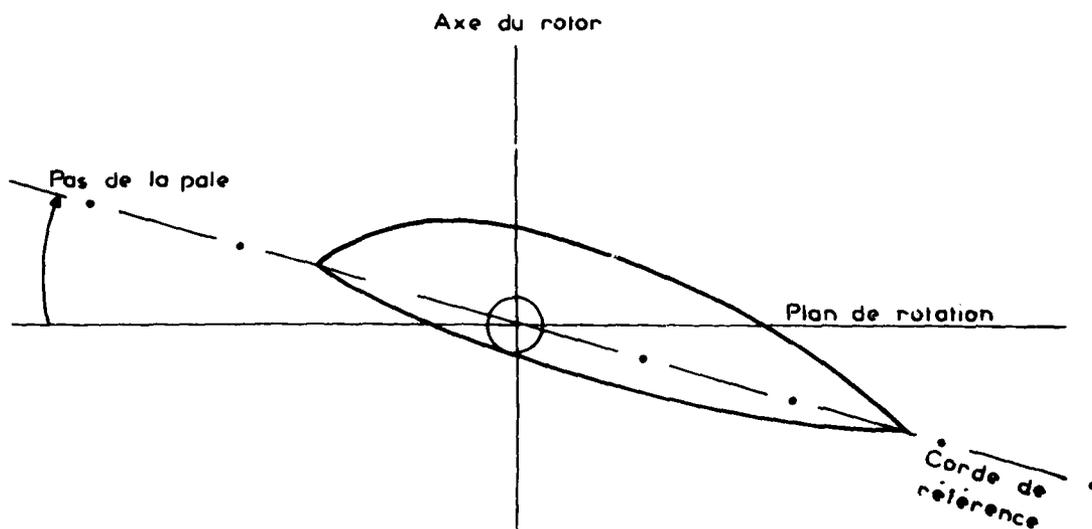


Figure 171 : Pas de pale axe du rotor et plan de rotation
(d'après J.RICHARD)

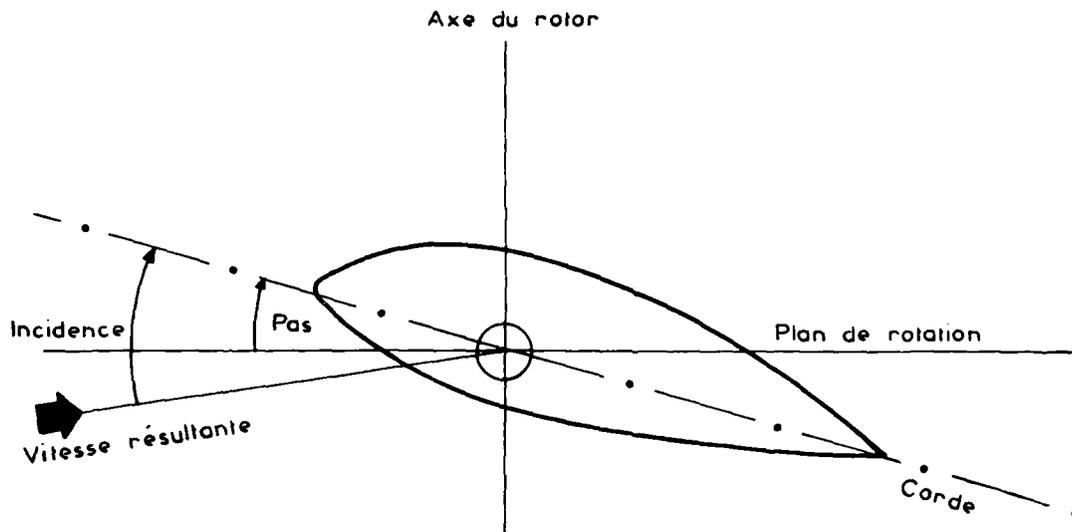


Figure 172 : Rotor en vol stationnaire (d'après J. RICHARD)

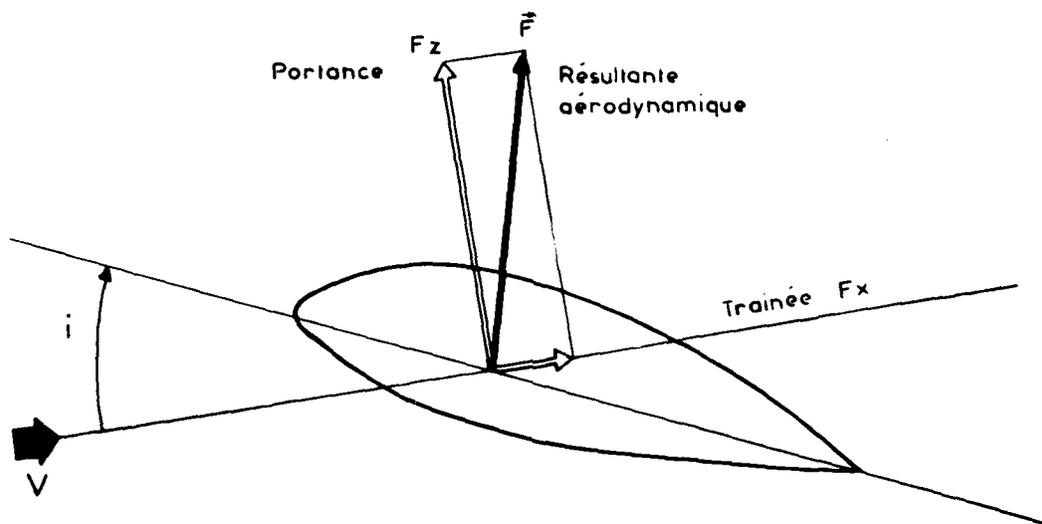


Figure 173 : Rotor en vol stationnaire (résultante aérodynamique)
(d'après J. RICHARD)

de rotation du rotor (fig 171).

L'incidence est l'angle que fait la corde de référence du profil avec le déplacement par rapport à l'air (vitesse aérodynamique). Lorsque le rotor fournit de la portance, l'incidence est différente du pas (fig 172).

L'intensité et l'inclinaison de la résultante aérodynamique dépendent de l'incidence. La résultante aérodynamique peut se décomposer en une force de trainée parallèle à la vitesse et en une force de portance perpendiculaire à la vitesse. (Fig 173).

La portance d'un élément de voilure est proportionnelle à sa surface (S) , à la masse volumique de l'air (ρ) au carré de sa vitesse de déplacement et au coefficient de portance du profil Cz :

$$F_z = \frac{1}{2} \rho S U^2 C_z$$

Le coefficient de portance Cz varie de façon sensiblement linéaire avec l'incidence, sauf au voisinage du décrochage (Fig 174).

Du fait de l'articulation de battement qui permet une certaine conicité (a) et de son déport (d) par rapport à l'axe du rotor, la sustentation résultante du rotor est située très au dessus du noyau, au foyer du rotor (hf) (Fig 175).

Sauf dérèglages, le centre de gravité du rotor et la sustentation sont sur l'axe de rotation. Pour ces raisons, le niveau vibratoire est en général faible en vol stationnaire.

Il faut cependant signaler que ce vol stationnaire effectué assez près du sol va engendrer des vibrations par " effet du sol ", c'est à dire créer des turbulences dues aux mouvements de l'air mis en mouvement par les pales.

2. Le rotor en vol de translation (J. RICHARD)

Dissymétrie de portance

Lorsque l'hélicoptère vole en translation, la vitesse d'avancement V du Centre du rotor se compose à la vitesse de rotation des pales U (Fig 176).

La pale " avançante " a une vitesse résultante U + V tandis que la pale " reculante " a pour vitesse U - V. Avec un rotor indéformable, la portance de la pale avançante croît et celle de la pale reculante décroît.

Nécessité de l'articulation de battement

L'utilisation de rotors déformables (articulés ou souples) permet aux pales de battre.

L'articulation de battement laisse la pale monter ou descendre par rapport au plan d'entraînement. L'angle B est l'angle de battement de la pale. Sa valeur moyenne B₀ représente la conicité du rotor (Fig 177).

Chaque élément de la pale est en équilibre entre les forces de portance, centrifuge et d'inertie. La force centrifuge étant constante pour un régime rotor donné, l'angle de battement dépend essentiellement de la portance (Fig 178).

Il s'ensuit que le moyeu impose à la pale qui monte un chemin plus important (DB) que la parcours correspondant à sa propre rotation (DC).

Avec un rotor rigide tournant à vitesse constante, l'extrémité de pale est donc contrainte d'accélérer par rapport à son axe de rotation virtuel, ce qui lui impose une variation d'énergie cinétique importante et un moment de flexion dans son plan considérable. Il est possible de supprimer ces inconvénients en articulant la pale en trainée. Au cours de la rotation, elle recule par rapport au moyeu pour venir se placer en C de façon à conserver une vitesse périphérique, donc une énergie cinétique constante . Naturellement, le phénomène inverse se produit lorsque la pale descend.

Contrairement au mouvement de battement, l'oscillation de trainée est insuffisamment stable et doit être freinée par un amortisseur de trainée (Fig 178).

3. Vibrations causées par le rotor principal (Fig 179 et 180)

Les mouvements des pales en battement et en trainée, à la fréquence de rotation du rotor, soumettent le moyeu à des forces périodiques verticales et horizontales, de fréquence 1ω (1 par tour) et $b\omega$ (b = nombre de pales).

Ces forces sont transmises à la cellule par le moyeu.

Ces phénomènes sont d'ailleurs compliqués par les déformations des pales. En effet, si l'on compose de proche en proche les forces agissant sur chaque élément de pale, on constate que chaque pale se déforme à chaque tour selon son azimut.

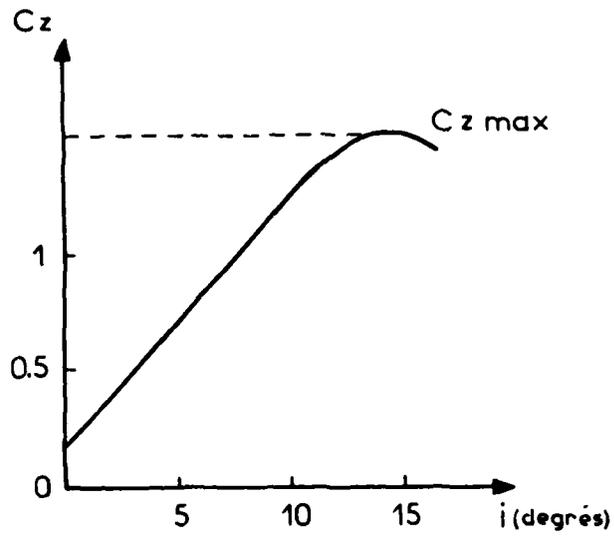


Figure 174 : Variation du coefficient de portance avec l'incidence de la pale
(d'après J. RICHARD)

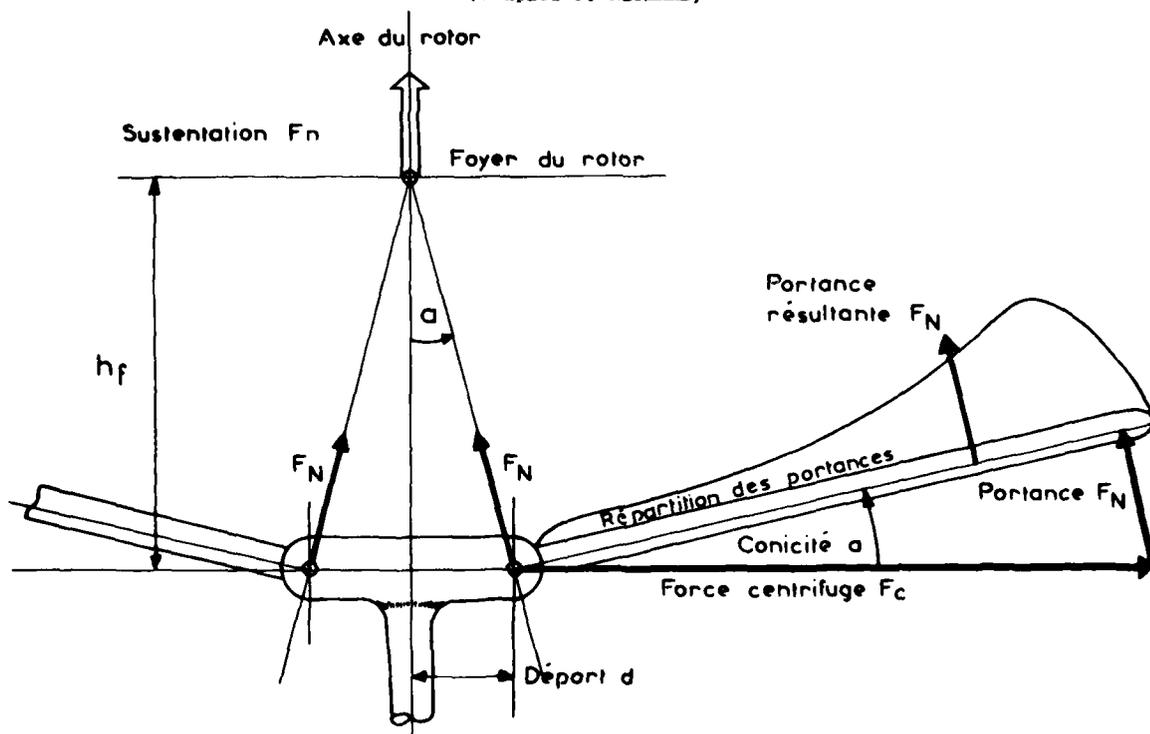


Figure 175 : Rotor en vol stationnaire
Répartition des portances (d'après J. RICHARD)

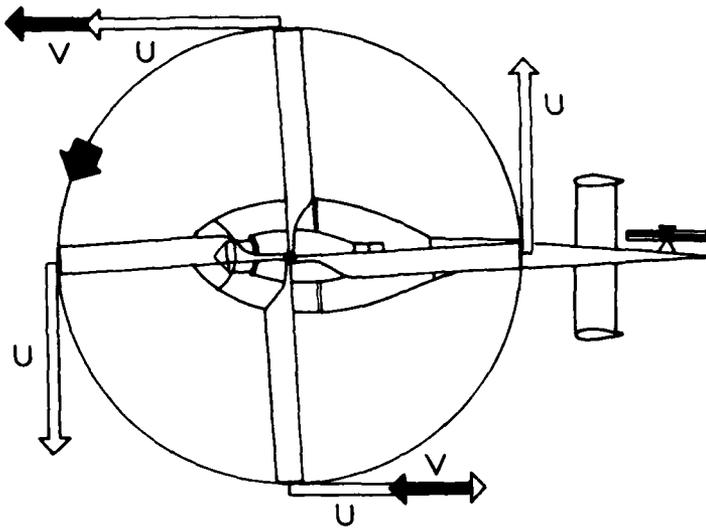


Figure 176 : Vol de translation de l'hélicoptère (d'après J. RICHARD)

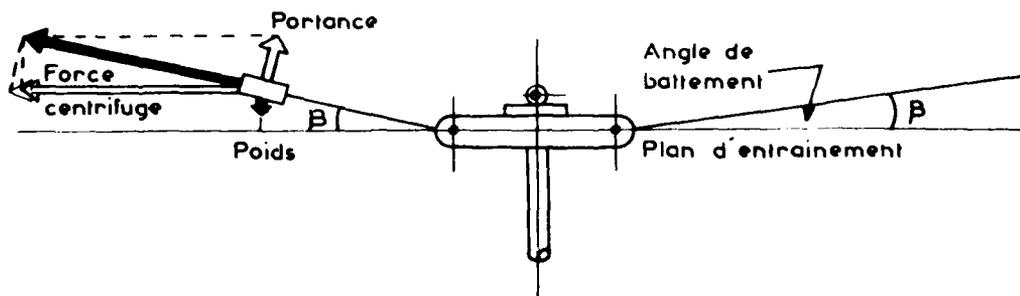


Figure 177 : Articulation de battement (d'après J. RICHARD)

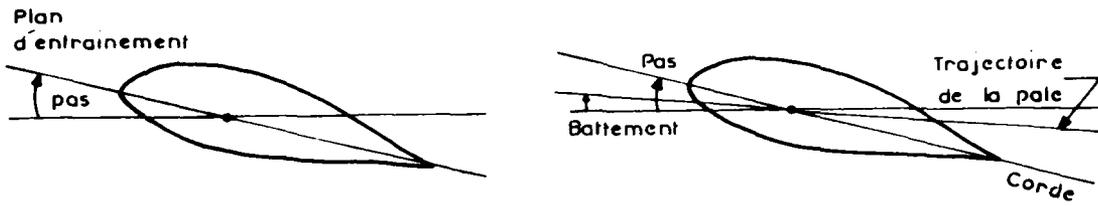


Figure 178 : Le battement de la pale montante (à droite) diminue l'incidence (d'après J. RICHARD)

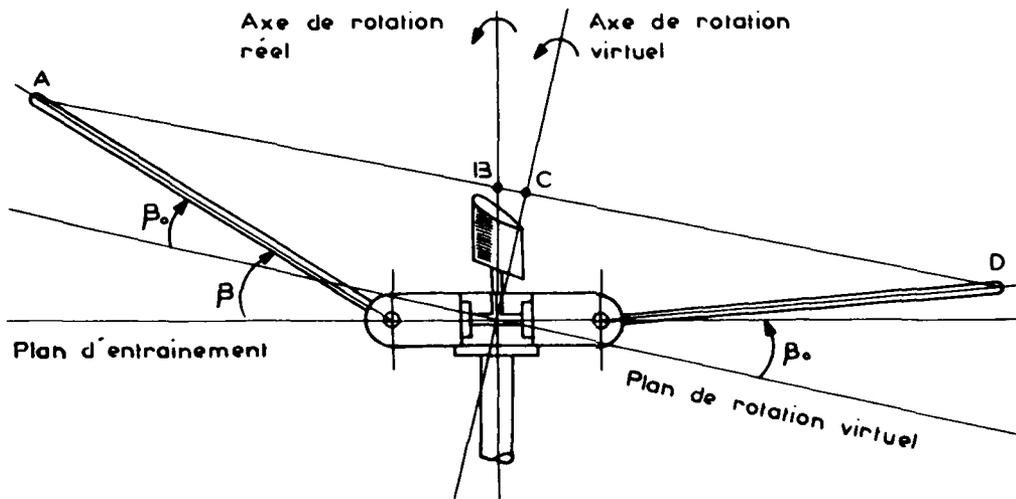


Figure 179 : Axes de rotation de l'hélicoptère (d'après J. RICHARD)

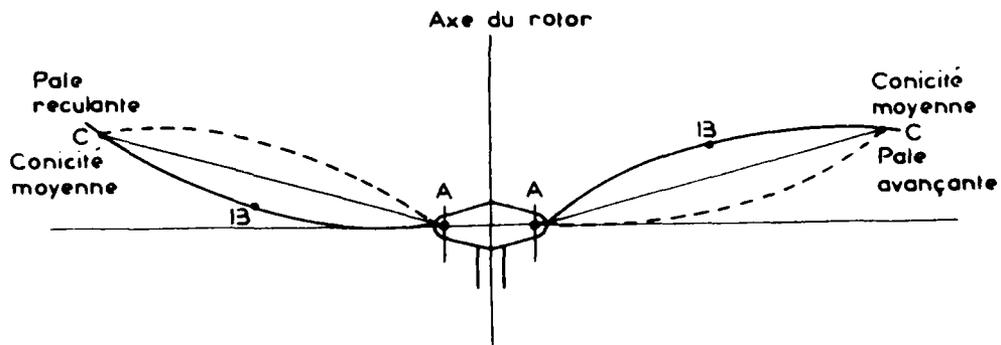


Figure 180 : Conicité moyenne des pales avançantes et reculantes (d'après J. RICHARD)

Le battement permet donc à la pale de monter lorsque sa portance crdt et de descendre quand elle décroît/La vitesse de montée ou de descente est proportionnelle à l'angle de battement. La vitesse de battement se compose avec la vitesse résultante de la pale : $U + V$ pour donner l'incidence réelle de l'élément depale.

Lorsque la pale monte, l'incidence diminue, ce qui permet d'égaliser les portances et d'annuler le couple de raulis que la dissymétrie des vitesses tend à créer. Il faut remarquer que la vitesse de montée est maximale par le travers de l'hélicoptère, donc la pale occupe sa position la plus haute en avant et la plus basse en arrière du disque (pour ces positions, la vitesse de battement est nulle). Le rotor est donc basculé vers l'arrière par rapport à son plan d'entraînement.

Le mouvement de battement est stable, car la pale, en équilibre autour de son articulation de battement sous l'effet de sa portance, de sa force centrifuge et des forces d'inertie, ne monte et ne descend que de la valeur strictement nécessaire à l'égalisation des portances.

Nécessité de l'articulation de trainée

A cause du mouvement de battement, l'hélicoptère vole avec un rotor déformé dont l'axe de rotation virtuel est décalé par rapport à l'axe de rotation réel.

C'est à dire qu'à chaque révolution, la pale est sollicitée en flexion alternée avec des contraintes alternées qui peuvent être très importantes dans certains cas de vol (zone de transition vol à grande vitesse - vol de virage ou en ressource).

En fait, lorsque la vitesse d'avancement croît, d'autres phénomènes contribuent à amplifier les déformations du rotor, et sont une source supplémentaire de vibrations. Ce sont : le décrochage de la pale reculante, la présence du cercle d'inversion et les phénomènes de compressibilité sur la pale avançante.

Aux vibrations " naturelles " dont nous venons de parler, s'ajoutent les vibrations dues à des dérèglages, à des défauts d'équilibrage ou à l'usure des profils par érosion.

Ces défauts se traduisent presque toujours par une amplification sensible du niveau vibratoire, le plus souvent à la fréquence 1ω mais aussi, parfois à la fréquence $b \omega$

4. Vibrations provoquées par le rotor anticouple

Le rotor anticouple travaille dans des conditions très voisines du rotor principal, il est donc normal qu'il provoque également des forces périodiques horizontales et verticales qui contribuent à détériorer l'ambiance vibratoire de l'hélicoptère. Il faut remarquer encore que le rotor anticouple étant le plus souvent de dimensions modestes, les constructeurs suppriment les articulations de trainées, voire de battement. Il en résulte un fonctionnement avec des déformations réparties (pales et moyeux souples) qui ne modifient pas fondamentalement le fonctionnement du rotor par rapport aux articulations mécaniques en battement et en trainée. Ces rotors " rigides " sont cependant assez délicats à réaliser et engendrent généralement un niveau vibratoire élevé. Ceci est également vrai pour la plupart des rotors principaux " rigides ".

5. Autres sources de vibrations

Le passage d'une partie du rotor ou de la cellule dans le sillage d'un autre élément peut provoquer des vibrations aérodynamiques à basse fréquence (buffeting).

Tous les éléments en rotation - et ils sont nombreux- (moteurs-réducteurs-arbres de transmission) sont susceptibles de créer des forces excitatrices à leur fréquence de rotation ou leurs harmoniques. Un bon équilibrage de ces éléments permet généralement de les ramem à un niveau acceptable.

En résumé, les vibrations d'origine mécanique sont de basse fréquence provoquées par le rotor principal tournant à la fréquence ω et par les pales de ce rotor.

Les principales causes retenues peuvent être :

- le fonctionnement des dispositifs articulés (pas cyclique, battement) ; liés à la technologie même de l'appareil, ils engendrent des vibrations de fréquence $b \omega$ principalement sur l'axe Z (siège-tête).

- la différence de trainée des pales avançantes et reculantes ;

- le mauvais réglage en incidence d'une pale par rapport aux autres entraînent une vibration de fréquence ω selon l'axe Z ;

- éventuellement un défaut d'équilibrage statique des pales (balourd) créant une oscillation de fréquence ω perpendiculaire à la précédente.

Enfin, il faut ajouter les vibratims de haute fréquence qui ont pour origine :

- le fonctionnement des moteurs ou turbines ;
- le rotor de fréquence ω et ses b pales (fréquence $b \omega$)
- les organes mobiles de transmission.

6.1.6.3. Les vibrations d'origine aéronautique

De très basse fréquence, elles sont dues aux réponses de la cellule aux excitations aérodynamiques et aux actions du pilote à travers les servocommandes (SERIS, AUFFRET) ; elles sont importantes dans les évolutions à grande ou faible vitesse, lors du survol de zones accidentées à basse altitude ou en vol stationnaire près du sol.

6.1.6.4. Caractérisation des vibrations et mesures d'accélération

On peut caractériser une vibration en mesurant sa fréquence et son amplitude (déplacement ou accélération). Dans le cas de l'hélicoptère, l'opération est délicate, car le spectre des fréquences est très riche et les modes vibratoires de la cellule nombreux. L'information n'a de valeur que si l'on connaît l'endroit où la mesure a été effectuée, l'axe (X, Y ou Z), la fréquence à laquelle on s'est intéressé et l'unité de mesure.

La mesure des vibrations par analyse spectrale ou analyse de fréquence qui donne la répartition des énergies mises en jeu en fonction de la fréquence a été réalisée au CEV pour différents types d'hélicoptères ; elle a permis de retrouver pour chaque appareil deux pics de basse fréquence caractéristiques correspondant à (3,7 à 8,5 Hz) et N (15 à 22 Hz).

Si le premier pic, dû à un réglage défectueux peut être considérablement réduit, le second inhérent au fonctionnement même de l'hélicoptère, est inévitable.

La réponse du corps humain à ces vibrations a pu être évaluée en vol au moyen d'accéléromètres placés sur le siège et les principales masses corporelles. On peut également l'étudier au laboratoire grâce à des tables vibrantes. Le Laboratoire de Médecine Aérospatiale possède un générateur de vibrations électro-hydrauliques qui peut être actionné soit par un programme régulier (sinusoïde), soit par une bande magnétique reproduisant les vibrations enregistrées à bord des appareils.

6.1.6.5. Evaluation du niveau vibratoire par appréciation subjective

Pour pallier les difficultés liées à l'interprétation des mesures, le Centre d'Essais en Vol de Brétigny demande à ses équipages d'essais, d'évaluer le niveau vibratoire de chaque appareil nouveau. Pour ce faire, chaque membre d'équipage attribue séparément une note de 0 à 10 pour chaque configuration de vol.

L'échelle de cotation mise au point en commun par le Centre d'Essais en Vol de Brétigny et l'Armament and Aeronautical Experimental Establishment de Boscombe-Down classe les différents niveaux vibratoires en fonction de la gêne ressentie dans l'accomplissement d'une mission (tableau 6-2)

6.1.6.6. Echelle d'appréciation du niveau vibratoire d'un hélicoptère (tableau 6.2)

- Le critère d'appréciation est un critère opérationnel : l'équipage apprécie l'influence du niveau vibratoire sur l'exécution de la mission de l'appareil.

- La note 6 correspond à un appareil acceptable, la note 7 à un appareil inacceptable.

0	:	:	L'hélicoptère ne vibre pas
1	:	:	Un équipage expérimenté pleinement occupé par sa mission ne ressent pas les vibrations mais il les décèle s'il y porte son attention où s'il n'est pas occupé par ailleurs
2	:	Vibrations légères	
3	:	:	
4	:	:	Un équipage expérimenté ressent les vibrations mais elles n'influencent pas sur l'accomplissement de la mission, du moins à court terme.
5	:	Vibrations modérées	
6	:	:	
7	:	:	Un équipage expérimenté ressent immédiatement les vibrations, même s'il est complètement occupé par sa mission - Son efficacité en est réduite et il accomplit certains travaux seulement avec difficultés.
8	:	Vibrations sévères	
9	:	:	
10	:	Vibrations intolérables	L'équipage a comme seule préoccupation la diminution du niveau vibratoire
	:	:	
	:	:	
	:	:	
	:	:	

Tableau 6 - 2

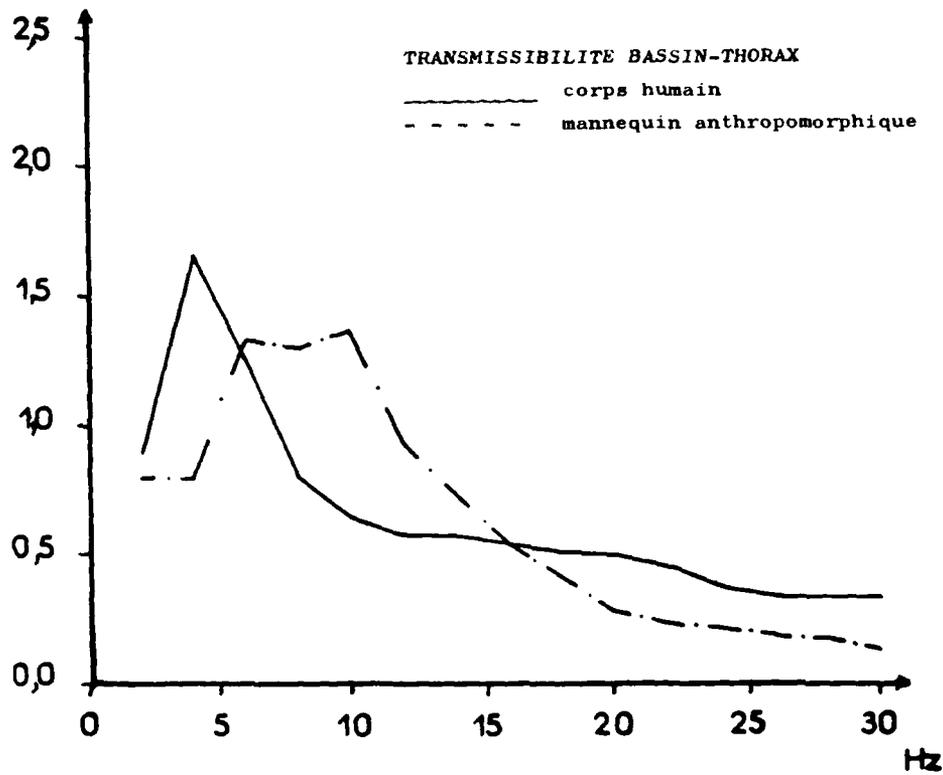


Figure 181 : Comparaison de la transmissibilité des vibrations sur le corps humain et sur un mannequin anthropomorphique
 en abscisse : fréquence en Herz
 en ordonnée : rapport d'accélération tête-thorax
 d'après J.L. POIRIER (184)

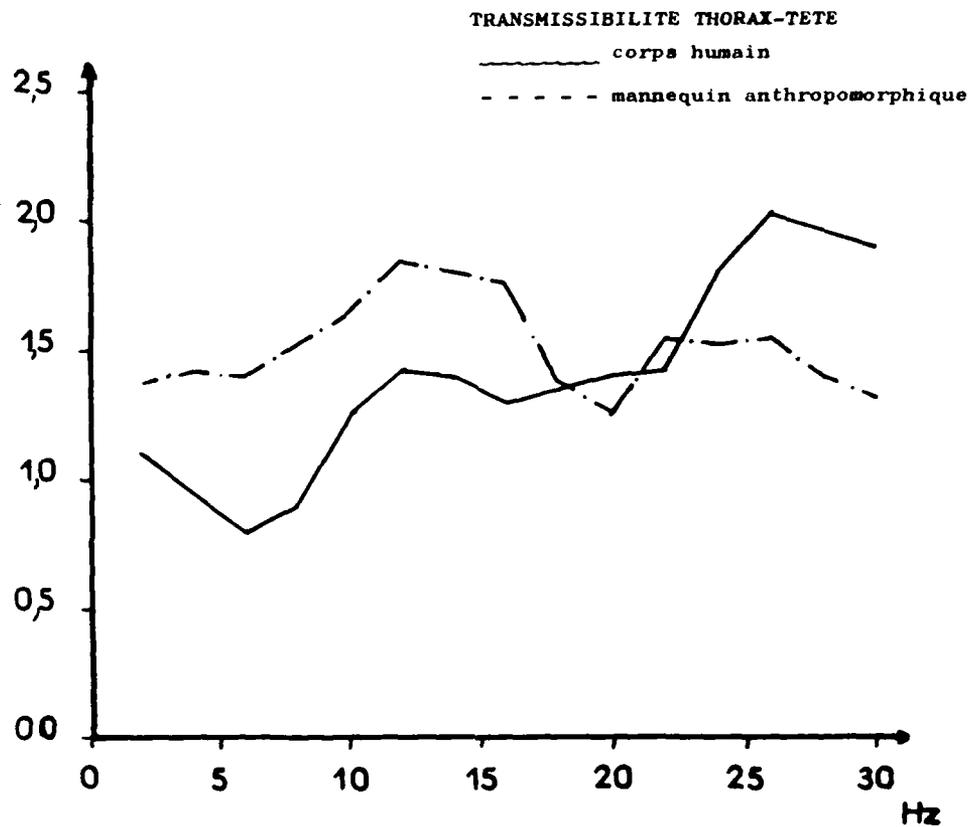


Figure 182 : Comparaison de la transmissibilité des vibrations sur le corps humain et sur un mannequin anthropomorphique
en abscisse : fréquence en Herz
en ordonnée : rapport d'accélération tête-thorax
d'après J.L. POIRIER (184)

Avec un peu d'expérience, les résultats obtenus sont remarquablement cohérents. La dispersion existe, car certains expérimentateurs sont plus sévères ou plus sensibles que d'autres, mais elle est relativement faible en fin de vol, lorsque toutes les configurations ont été étudiées. Cette méthode permet d'obtenir rapidement et sans installation de mesure, l'évolution du niveau vibratoire en fonction de la vitesse, de la puissance, du chargement ou de tout paramètre. Elle est particulièrement utile pour évaluer rapidement l'influence d'une modification.

6.1.7. RESULTATS DES MESURES DE VIBRATIONS DES HELICOPTERES

6.1.7.1. Effets physiologiques des vibrations

Ils sont dus aux déformations et aux déplacements que subissent les organes ou les tissus à certaines fréquences. Les travaux de DIEKMANN (79), HAACK (122), COERMANN (38)(39) facilitent par l'emploi de modèles analogiques simples, l'étude de l'action des vibrations d'axe Z sur l'organisme et plus particulièrement sur le rachis.

Pour chaque segment du corps humain, il existe une FREQUENCE DE RESONANCE C'est une fréquence à laquelle la transmission du mouvement appliqué au support est maximale. Au delà de cette fréquence, la transmissibilité diminue : c'est l'effet filtre.

Les actions physiopathologiques des vibrations dépendent de la fréquence de résonance des différentes masses corporelles et de la fréquence imposée au support.

La fréquence de résonance pour le thorax dans son ensemble est de 4 à 6 Hz (GOLDMANN et VON GIERKE) (108)(109) ; de 12 à 14 Hz pour la partie supérieure du thorax avec flexion en avant du rachis, de 20 à 30 Hz pour la tête.

D'une façon globale, entre 2 et 10 Hz, l'amplitude de la réponse est supérieure à celle de l'excitation. Au delà elle diminue. La tête entre 20 et 30 Hz possède une amplitude de vibration 3 fois plus grande que le segment adjacent.

- J.L. POIRIER (184)(185) mesure sur table vibrante les transmissibilités entre les trois principales masses corporelles : le thorax, le bassin et la tête. Ces modèles sont valables. On retrouve les résonances de 3 à 6 Hz pour le thorax, de 20 à 30 Hz pour la tête en mesurant les rapports d'accélération thorax/bassin et tête/thorax. Des faibles variations individuelles dues à la morphologie spécifique de chaque sujet sont observées.

- A bord des hélicoptères, grâce aux mesures effectuées à bord, des valeurs du même ordre sont retrouvées. Les yeux vibrent avec la tête pour une fréquence de 60 à 90 Hz le larynx pour 20 Hz, ce qui explique les difficultés du pilotage d'hélicoptères dans certaines évolutions.

- Les modèles mathématiques ne décrivent pas très bien les phénomènes de transmissibilité des vibrations sur les mannequins anthropomorphiques. J.L. POIRIER observe une grande différence entre le mannequin et l'homme pour des vibrations sinusoïdales de 0 à 30 Hz et pour des accélérations constantes pour chaque fréquence de 0,3 et 0,6 G efficaces. Il apparaît un décalage des fréquences de résonance. Pour le thorax, elles passent de 4 Hz chez l'homme à 8-18 Hz chez le mannequin. La transmissibilité est différente chez l'homme et le mannequin pour des fréquences variant de 2 à 30 Hz (fig 181 et 182)

- Le siège d'hélicoptère amplifie les vibrations jusqu'à une fréquence de 10 à 15 Hz puis tend à les amortir pour des fréquences supérieures. Cette amplification aux basses fréquences, pouvant atteindre des rapports de 2,5 contribue à augmenter les contraintes vertébrales.

6.1.7.2. Mesures sur Super-Frelon (1967)

H. SERIS, R. AUFFRET et Coll (207) publient les mesures des accélérations sur le siège, le bassin, le thorax du pilote de Super-Frelon en fonction des fréquences observées sur les différents axes de référence X, Y, Z.

1. En vol stationnaire avec effet de sol

- sur l'axe Z :

- . de 2 à 11,5 Hz : amplification minime entre le siège et le bassin, avec des valeurs d'accélération peu importantes, 0,1 à 0,2 m/s² ;
- . à 20 Hz : amortissement (rapport 2) entre le siège 1,2 m/s² et le bassin 0,6 m/s² ;
- . à 40 Hz : amortissement dû au siège (rapport 4) avec 0,1 m/s² sur le bassin.

- sur l'axe Y :

- . à 20 Hz : amplification (rapport 2) entre le siège et le bassin (1,5 m/s²) et amortissement (rapport 2,4) entre le bassin et le thorax (0,7 m/s²).

2. En vol de transition avant

- sur l'axe Z :
 - . à 20 Hz : amortissement (rapport 2) entre le siège 3,2 m/s² et le bassin 1,5 m/s²
- sur l'axe Y :
 - . à 20 Hz : amplification (rapport 2,5) entre le siège 1,2 m/s² et le bassin 2,9 m/s².

3. En vol de palier

- sur l'axe Z :
 - . à 20 Hz amortissement faible entre le siège 0,6 m/s² et le bassin 0,5 m/s²
- sur l'axe Y :
 - . à 20 Hz : amplification (rapport 2,5) entre le siège 1,6 m/s² et le bassin 3,4 m/s².

Les vibrations qui se situent dans la gamme de résonance du corps humain ne sont pas totalement amorties par le siège même pour des valeurs d'accélération très faibles.

Les vibrations de fréquence 20 Hz d'origine mécanique, situées au dessus des résonances du corps humain sont moins ressenties. Sur l'axe Z, elles sont bien amorties par le siège, tout en gardant des valeurs d'accélération élevées. Par contre, sur l'axe Y, le siège les amplifie, avec des accélérations assez élevées. Il se produit alors des sollicitations transversales du bassin du pilote, avec des phénomènes de cisaillement sur le squelette, les ligaments et les muscles dont l'action exacte demeure inconnue.

Dans l'ensemble, ces données confirment la bonne réputation de l'appareil auprès des utilisateurs. La position de pilotage est conforme aux données de WISNER sur les angles de confort : le siège légèrement incliné en arrière, les commandes bien placées, en particulier le levier de pas collectif. Le pilote n'est pas obligé de se pencher en avant et à gauche.

6.1.7.3. Mesures sur Puma SA 330 (208)(210)

Les accélérations obtenues, d'une façon générale, sont beaucoup plus importantes. Pour les très basses fréquences, les valeurs sont élevées. Sur l'axe Z, on note une amplification entre le bassin 1 m/s² et la tête 1,2 m/s².

1. En palier à 1000 mètres, à 250 km/heure

- sur l'axe Z :
 - . à 8,5 Hz : amplification (rapport 3) entre le siège 0,8 m/s² et le bassin 2,5 m/s² ;
 - . à 17 Hz : amplification (rapport 2,6) due au siège entre le plancher 1 m/s² et le bassin 2,6 m/s² ;
- sur l'axe Y valeurs élevées des accélérations :
 - 4,4 m/s² au plancher
 - 6,3 m/s² au bassin

2. En descente à 50 km/heure

- sur l'axe Z :
 - . à 17 Hz : amplification (rapport 2) due au siège entre le plancher 1,2 m/s² et le bassin 2,8 m/s²

3. En vitesse maximale 320 km/heure

- sur l'axe Z :
 - . à 17 Hz : valeurs élevées des accélérations du niveau du plancher 2,6 m/s² amorties au niveau de la tête 1,5 m/s².

Au cours des virages, les valeurs d'accélération sont très élevées, sur l'axe Y à 17 Hz on note 5,6 m/s² et 6,8 m/s² au niveau du bassin.

Aux très basses fréquences, les vibrations ont des valeurs élevées et ne sont pas amorties par le siège. Les vibrations d'origine mécanique (17 Hz) ont des valeurs très élevées et sont amplifiées par le siège dans des rapports importants. L'amortissement dû aux muscles péri-rachidiens est insuffisant, puisque les valeurs d'accélération restent élevées au niveau de la tête. Ceci explique l'apparition de troubles visuels au cours de l'expérimentation, avec l'impossibilité de distinguer l'aiguille et les chiffres d'un cadran fixé face à l'expérimentateur et bien lisibles à l'arrêt et en dehors de la bande de fréquence 15 à 25 Hz. La fréquence de 17 Hz reste assez près des résonances du corps humain pour être perçue.

6.1.7.4. Alouette II (1971)(212)

Les vibrations sont peu élevées, avec des accélérations peu importantes dans toutes les gammes de fréquence, en particulier celles qui nous intéressent (0,1 m/s² à 0,5 m/s²).

En palier à 85 noeuds à 1000 mètres

- à 18 Hz sur l'axe Z : amplification due au siège entre le plancher 0,5 m/s² et le bassin 0,9 m/s²
- à 18 Hz sur l'axe Y : amplification entre le plancher 0,15 m/s² et le bassin 0,75 m/s².

Les valeurs les plus élevées sont retrouvées en autorotation avec, sur l'axe Z, 0,25 m/s² au plancher et 1,15 m/s² au bassin.

Bien que le siège amplifie les vibrations, les valeurs d'accélération restent néanmoins peu élevées, le niveau vibratoire de l'appareil peut être considéré dans l'ensemble comme peu nocif.

6.1.7.5. Alouette III (1971) (212)

Les niveaux vibratoires sont plus élevés que sur l'Alouette II, variant de 0,5 m/s² à 1 m/s². Les caractéristiques du siège sont meilleures dans l'ensemble, sauf au moment des phases de vol suivantes où il y a amplification :

- En croisière à 1000 mètres :

- à 17,6 Hz : sur l'axe Z : amplification (rapport 2) entre le plancher 0,5 m/s² et le bassin 1,05 m/s²
- sur l'axe Y : amplification (rapport 2) entre le plancher 0,6 m/s² et le bassin 1,25 m/s²

- En autorotation :

- à 17,5 Hz : sur l'axe Z : amplification (rapport 3) entre le plancher 1,2m/s² et le bassin 3,6 m/s²
- sur l'axe Y : amplification (rapport 5) entre le plancher 0,45m/s² et le bassin 2,15 m/s².

En résumé, si les caractéristiques du siège sont meilleures que sur Alouette II, le niveau vibratoire est plus élevé. L'incidence est un peu plus importante sur le plan pathologique.

TYPE	:Alouette: : II :	H 34	:Alouette: : III :	Super Frelon :	Puma :	Gazelle :	Lyn :	L. 311n
ANNEE de CONSTRUCTION	: 1955 :	1956	: 1959 :	1962	: 1965 :	1967	: 1971 :	1972
PROPULSION	: Turbine :	Moteur piston	: Turbine :	3 turbi- nes libres	: 2 turbi- libres :	Turbine	: 2 turbi- libres :	Turbine
FREQUENCE Hz	: 18 :	15	: 17,5 :	20	: 17 :	19	: 21,7 :	23,3
ACCELERATION Croisière(g)	: 0,2 :	0,2	: 0,3 :	0,1	: 0,1 :	0,15	: 0,2 :	0,15
ACCELERATION V.N.E.(g)	: 0,2 :	0,3	: 0,35 :	0,1	: 0,22 :	0,25	: 0,4 :	0,22

Tableau 6 -3 : Mesures de niveau vibratoire
Axe Z (C.E.V. de Brétigny) (75)

6.1.8. EXPERIMENTATION AVEC DES COUSSINS DE SIEGE

J.L. POIRIER (184)(185) étudie la transmission des vibrations à travers différents sièges d'hélicoptères ou différents coussins équipant un même siège d'hélicoptère.

La transmission varie du simple au double selon le type de coussin ou de siège.

Les niveaux vibratoires mesurés au niveau du bassin du pilote sont assez élevés aux basses et aux très basses fréquences. Dans la gamme des fréquences nocives pour le pilote, il existe une amplification notable entre le siège et le bassin, due au coussin du siège. Pour les fréquences de 1 à 20 Hz, cette constatation est retrouvée pour tous les types de siège (Fig 183 et 184).

Avec WISNER (246)(247)(248) et BERTHOZ (24)(25)(26), il faut insister sur l'importance des déphasages des différentes masses suspendues qui seraient particulièrement nocifs pour le rachis, en particulier les changements de phase thorax-bassin. Outre ces mouvements axiaux, les vibrations d'axe Z produisent sur la colonne vertébrale des oscillations d'avant en arrière. Entre 12 et 14 Hz par exemple, la colonne dorsale fléchit en avant. Au niveau de la tête, il se produit des oscillations horizontales. Ce mouvement d'avant en arrière, aggravé par la position en hyperextension et par le port du casque ajoutant une certaine inertie au système peut créer des douleurs; l'action des vibrations d'axe X ou Y sur le rachis - par le biais des forces de cisaillement et amplifiées par le coussin du siège, reste très mal connue.

6.1.9. MOYENS DE PROTECTION

Deux objectifs simultanés doivent être recherchés : adapter l'homme à son travail et la machine à son opérateur humain.

6.1.9.1. Protection contre les vibrations

1. Lutte contre les vibrations :

La lutte contre les vibrations constitue l'aspect de la prévention le plus intéressant mais le moins facile. Si seulement les basses fréquences intéressent le médecin, tous les niveaux de fréquence concernent l'ingénieur, dans la mesure où elles provoquent des phénomènes de contrainte des matériaux, et ainsi une usure plus rapide. Donc, toute amélioration du niveau vibratoire de la machine est aussi valable et favorable au confort du pilote.

En ce qui concerne les hélicoptères, des progrès considérables sont constatés au plan du niveau vibratoire dans les appareils de nouvelle génération. Ce fait a été mesuré sur GAZELLE et apprécié subjectivement par les pilotes sur le DAUPHIN et l'ECUREUIL derniers-nés de la production aéronautique française. Il est dû au perfectionnement technologique qui permet de remplacer des systèmes métalliques articulés par des pièces monobloc en matériau plastique, à l'installation d'amortisseurs (cylind-blocks) diminuant les vibrations engendrées par les rotors et les transmissions en mouvement.

Il faut attirer l'attention sur le caractère nocif des basses fréquences et sur le fait que l'abaissement de la fréquence de résonance d'un appareil n'est pas forcément bénéfique. Les fréquences de résonance du corps se situant entre 3 et 12 Hz principalement il faut veiller à ce que les vibrations des hélicoptères se situent en dehors de la zone. La définition de la fréquence de résonance d'un corps montre en effet qu'il suffit de quelques Hertz en plus ou moins pour que la réponse diminue considérablement. Une différence de quelques tours sur un moteur peut ainsi engendrer des battements désagréables.

2. Isolement du pilote :

Si les vibrations ne sont pas éliminées ou très atténuées, la prophylaxie essaiera d'isoler le pilote. Cet isolement se situe uniquement au niveau du siège qui transmet et amplifie ces vibrations.

- L'atténuation de la transmission des vibrations se fait par le montage d'une suspension spéciale à lames de torsion ou à amortisseurs hydropneumatiques. Cette solution onéreuse entraînant une augmentation de poids n'est pas employée.

- L'atténuation des vibrations au niveau du bassin. H. SERIS et R. AUFFRET (210) ont montré qu'il s'agit d'un problème difficile. Les coussins de siège amortissent assez bien les vibrations de fréquence élevée, mais sont inefficaces dans la gamme des résonances du corps humain et amplifient très souvent les déplacements. La difficulté se trouve au niveau du matériau destiné à composer le coussin. Dans la construction d'un siège, ce détail est tout à fait indépendant de la forme à donner à celui-ci en fonction des normes de confort.

J.L. POIRIER (185) étudie différents coussins de siège destinés à équiper le PUMA SA 330 (Fig 185). Il définit un coussin satisfaisant permettant un amortissement très sensible des vibrations. 5 types de coussins sont comparés avec le coussin d'origine

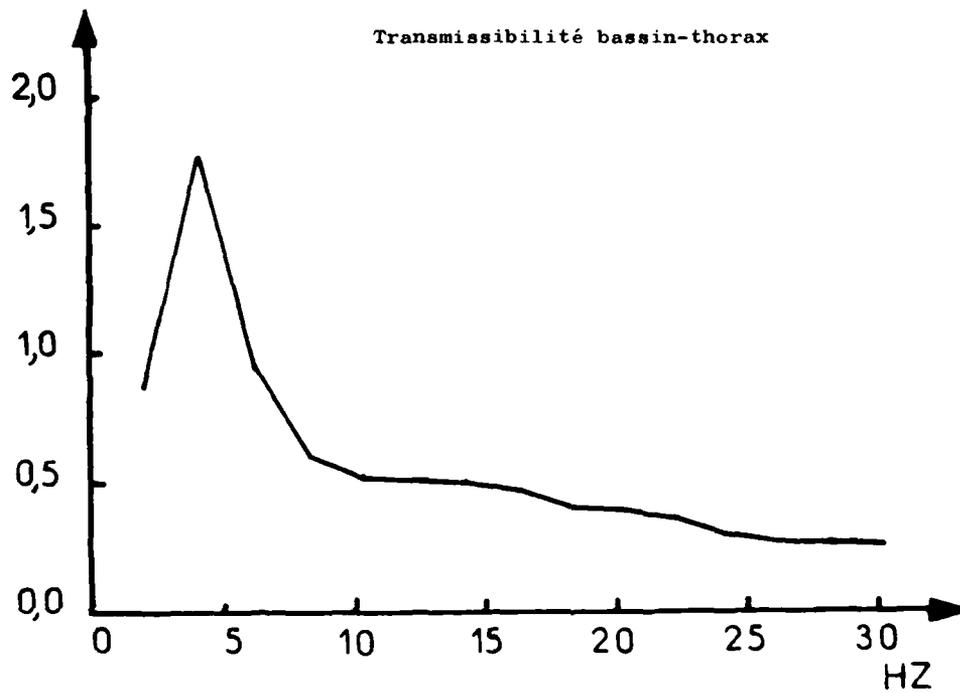


Figure 185 : Transmissibilité des vibrations à travers le corps humain
d'après J.L. POIRIER (184)
en abscisse : fréquence en Hertz
en ordonnée : rapport d'accélération thorax-bassin

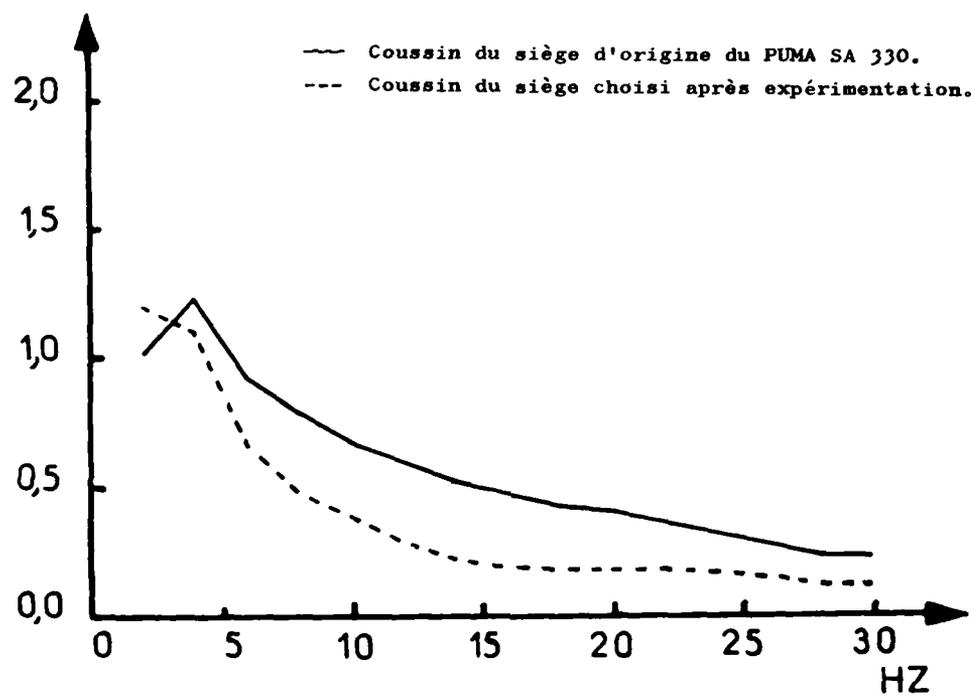


Figure 184 : Transmissibilité des vibrations à travers deux coussins du siège du PUMA SA 330
en abscisse : fréquence en Hertz
en ordonnée : rapport d'accélération bassin-plancher.

et un siège est réalisé avec un type de coussin.

Dans les plus basses fréquences jusqu'à 5 Hz, tous les sièges se comportent de la même manière. L'amplification est maximale. Il s'agit de fréquences de résonance de l'ensemble thorax-bassin et du siège lui-même. Il apparaît très difficile de gagner beaucoup d'amortissement dans ces fréquences.

Le coussin choisi donne une amélioration importante dans les zones de fréquences dominantes des hélicoptères 15-20 Hz. Dans 9 Hz, le niveau vibratoire est divisé par 2 et cette constatation est valable jusqu'à 20 Hz.

Enfin, la solution idéale se trouve peut être dans la mise au point de systèmes " actifs " d'isolement de l'utilisateur du siège. Le siège est lui-même vibrant. Des capteurs détectent dans tous les axes les rafales d'accélération dues aux turbulences. Ils transmettent, grâce à un système électronique et hydraulique des vibrations différentes qui isolent le siège en atténuant les vibrations auxquelles reste soumise la cellule de l'appareil. Ce siège expérimental est destiné à protéger les pilotes d'avions de combat volant dans les turbulences. Il pourrait aussi s'appliquer à l'hélicoptère mais ce système complexe, très lourd est d'un prix de revient très élevé.

En fait des solutions plus simples sont recherchées. L'Association d'Etudes pour les applications des oscillations mécaniques (ADOM) (Fig 186) a développé sous contrôle de la DRET, un siège monté sur amortisseurs d'air. Le siège est une amélioration de la maquette brevetée LE FORESTIER. Les premiers résultats sont assez satisfaisants. Il s'agit de toute façon d'une voie de recherche intéressante.

D'un autre côté, la SNIAS a étudié un coussin multimousse. Il s'agit d'un système de mousses de densités différentes, assemblées de manière à répartir les pressions d'appui un peu plus uniformément sur le fessier et le dos du sujet que les coussins traditionnels. Les résultats paraissent intéressants puisque par rapport au coussin traditionnel, on note un abaissement de la fréquence propre et de la fréquence de coupure de 1,5 à 2,5 Hz.

6.9.1.2. Les améliorations du poste de travail souhaitables, ne peuvent être que d'ordre économique. La suppression d'un des deux facteurs d'agression (posture), améliore la tolérance vis à vis de l'autre (vibrations). Les améliorations porteront sur le siège, les commandes, l'habitacle.

1. Le siège :

D'une façon générale, la courbure du siège doit correspondre aux angles de confort de WISNER (246). Malheureusement, il faut noter le caractère rudimentaire des sièges pilotes de certains hélicoptères : le coussin manque de largeur et ne se prolonge pas assez en avant. Des rebords latéraux enveloppants donneraient une meilleure stabilité latérale au bassin.

- La forme galbée du dossier du siège doit épouser la forme du dos et surtout les lombes. SLIOSBERG souligne que le dossier doit être légèrement incliné en arrière afin d'empêcher la position penchée en avant.

- La taille des pilotes intervient. En effet, elle est loin d'être homogène. L'inconfort du siège H 34, destiné pour des pilotes américains de grande taille et utilisé par des français plus petits, illustre cette affirmation (Fig 187, 188, 189).

Les sièges disposent d'un certain nombre de réglages :

- avancée en avant ou en arrière,
- réglage en hauteur (siège du H 21 et PUMA par ex)
- inclinaison en arrière du dossier.

Il faut laisser l'accès aux commandes et permettre une bonne visibilité. WISNER note que la multiplicité des réglages gêne parfois l'utilisateur et il n'est pas certain que le pilote trouve la position de confort qui lui convienne. Ces dispositifs coûteux (246) obligent à entreprendre une étude anthropométrique pour l'étude des sièges.

En 1965, un siège prototype du C.E.V. de Brétigny, étudié par GUIBAL et BROUSOLE (117) se compose d'un coussin et d'un dossier en plastique garni de billes de polystyrène se modelant à l'empreinte du sujet assis par l'intermédiaire d'une bombe à dépression. Le système ainsi expansé garde sa forme par l'artifice d'une valve antiretour. Cet équipement a l'avantage de s'adapter à la demande selon la morphologie du sujet. Ce siège dont on attendait beaucoup sur le plan de protection contre les vibrations fut un échec. Par contre, l'impression de confort apportée au pilote qui se sentait bien calé était remarquable. Ce procédé n'a pas connu d'extension.

Actuellement, ces coussins à dépression à billes de polystyrène épousant la morphologie du pilote sont étudiés par la SNIAS. Ce coussin installé sur le siège de l'hélicoptère est réglé lorsque le pilote est assis. Ainsi pour chaque vol, chaque pilote aura un coussin bien adapté.

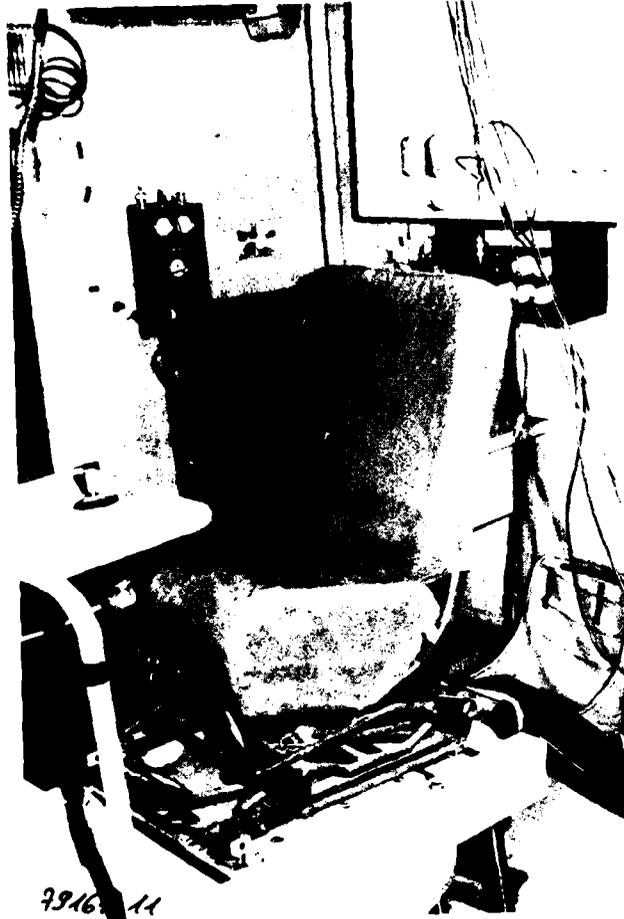


Figure 185 : Siège pilote du PUMA SA 330

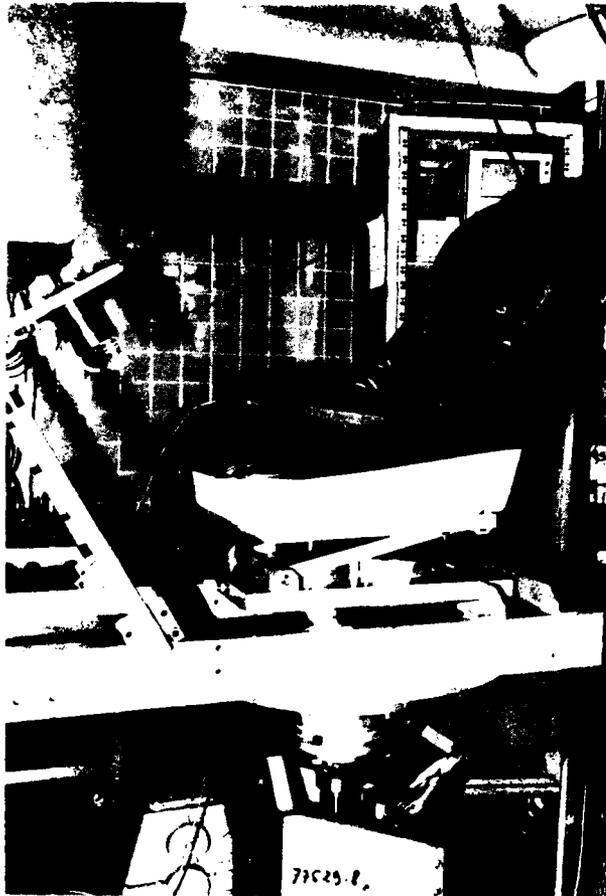


Figure 186 : siège A.D.O.M.

A notre avis, l'amélioration de la forme du siège vers des normes de confort bien connues actuellement est un facteur important de la prévention des phénomènes douloureux. Le squelette assurant la rigidité du corps remplit mieux son office s'il est soutenu. Si la musculature n'a pas à se contracter pour assurer le bon positionnement du corps, elle reste disponible pour jouer son rôle d'amortisseur physiologique (Fig 190 et 191).

2. Les commandes et l'habitacle

L'avènement des normes de confort ne doit pas faire oublier le rôle que peut jouer une bonne disposition des commandes.

- Le problème du palonnier semble, à notre avis, bien résolu actuellement, les pédales sont en général réglables en position éloignée ou rapprochée et conçues de telle façon que le pied fasse un angle droit avec la jambe et que le talon repose sur le plancher.

- Le levier de pas cyclique est aussi bien dessiné, la poignée doit être à une hauteur qui permette à l'avant bras droit de se reposer sur la cuisse. Signalons tout de même que cette commande oblige à une position penchée en avant au cours du vol.

- La disposition du pas collectif retient le plus notre attention, étant la plus responsable de l'attitude particulière du pilote. Pour cette raison, la position de pas minimal, presque horizontale sur tous les hélicoptères, est mauvaise. Elle devrait, en fait, être plutôt verticale, soit en donnant au levier une forme redressée, soit en lui donnant l'allure d'un " levier de vitesses au plancher ".

Ce levier, obligatoirement fixé au plancher beaucoup plus en avant, à hauteur du coude environ et accessible sans avoir à se pencher en avant, devrait avoir un angle d'augmentation de pas (normalement de 47°) plus réduit pour que le coude gauche ne vienne pas buter contre le dossier du siège. Un support pourrait éventuellement être articulé au niveau de la poignée pour que le poignet et l'avant bras gauche du pilote puissent se reposer à l'horizontale quelque soit l'angle de pas choisi par le pilote.

Ce problème de forme et d'emplacement des commandes n'en est pas un dans la mesure où les constructeurs veulent bien le résoudre. Dans ce même état d'esprit, c'est toute la technologie des moyens de commande et de pilotage qui devrait être repensée. Le levier n'est pas le seul moyen de commande possible, il est hérité de la technologie de l'avion qui en est riche. A ce sujet, il serait possible d'imaginer une petite console située à la place du pas cyclique, où seraient disposées deux petites poignées dont les mouvements auraient le même effet que les pas collectif et cyclique grâce à un système d'impulsion électrique.

En attendant l'application de ces vues futuristes et discutables, le progrès est apparu tout de même avec le montage de la servo-commande, qui diminue les forces nécessaires à appliquer sur les commandes et permet d'atténuer les vibrations ressenties par le pilote par l'intermédiaire des leviers. De même, le montage du Pilote Automatique pour certaines phases de vol (stationnaire, croisière) constitue un véritable événement dans le confort du pilote, puisque ce dernier peut se détendre en lâchant les instruments.

Enfin, il ne faut pas oublier que la visibilité au poste de pilotage, véritable critère de sécurité, doit être la meilleure possible pour que le pilote n'ait pas à se pencher en avant. Dans ce domaine, le montage des turbines au dos du fuselage, loin derrière le poste de pilotage, en permettant la construction de cabines avancées avec verrière ou bulle, a constitué un énorme progrès par rapport à l'hélicoptère à moteur situé à l'avant dans un énorme nez comme sur le H 34. Des améliorations sont à attendre au niveau du tableau de bord assez volumineux sur les hélicoptères lourds et placé entre les sièges du pilote et du copilote. La réduction du nombre des voyants de contrôle est peut-être possible, pour ne laisser aux pilotes et mécaniciens que les voyants de contrôle importants, ce qui amène un gain de place dans la cabine et permet l'installation de sièges vraiment confortables mais plus encombrants et plus lourds ce que les constructeurs refusent.

6.1.9.3. Moyens applicables au niveau du pilote

Il s'agit en toute logique de favoriser la résistance du pilote aux agressions, et de lui en éviter les surexpositions.

1. Augmenter la résistance rachidienne du pilote

Actuellement, il faut constater que le progrès de la motorisation n'a pas apporté que des bienfaits à l'homme. L'extension de l'emploi des véhicules les plus divers, dont l'automobile, fait que l'homme a perdu l'habitude de se déplacer par ses propres moyens, ce qui a pour effet d'entraîner une hypotrophie musculaire, en particulier au niveau des muscles participant à la statique vertébrale. Le pilote d'hélicoptère n'est pas exempt de cette remarque générale ; à fortiori, le problème devient préoccupant si la position au poste de travail est elle-même néfaste.

Le souci principal est donc de renforcer la musculature du pilote, qui doit lui-même en avoir pris conscience, et c'est là que le Médecin du P.N. peut jouer un grand rôle.

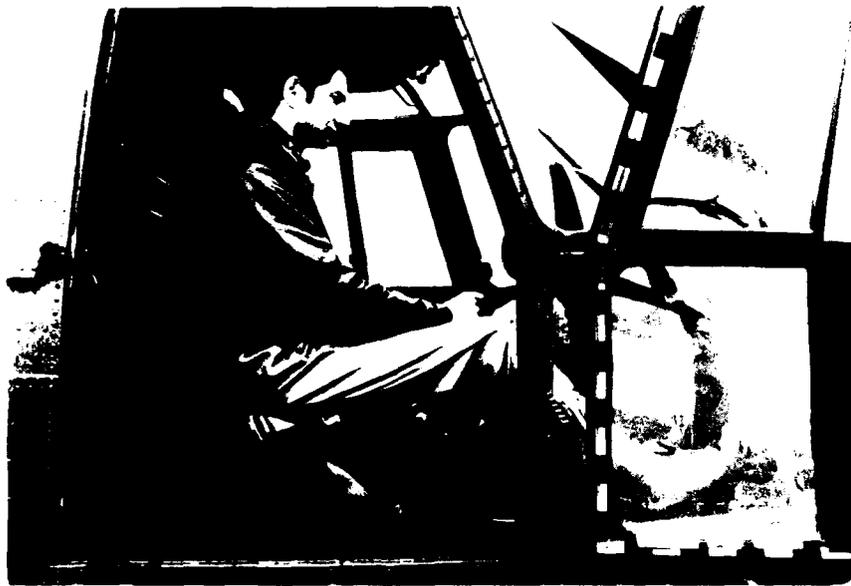


Figure 187 : Position de deux pilotes de morphologie différente sur le
siège pilote du PUMA SA 330

en haut : pilote de taille 1,62 m,
position des pieds défectueuse.

en bas : pilote de taille 1,88 m,
position penchée en avant,
très bonne position des pieds.



Figure 188 : Position de deux pilotes de morphologie différente
sur le siège pilote de la Gazelle,
Excellente position des deux pilotes de taille différente.



Figure 189 : Position de deux pilotes de morphologie différente sur le siège pilote du Dauphin

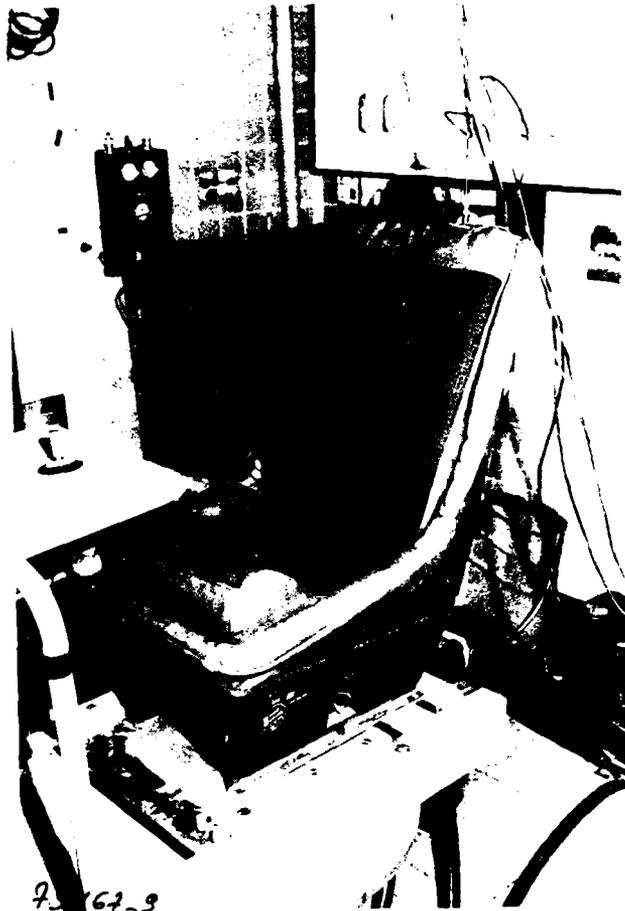


Figure 190 : Siège pilote du Dauphin

Le choix des moyens ne lui manque pas.

Il faut donc conseiller aux pilotes la pratique aussi régulière que possible de tous les sports développant les muscles des lombes et du dos, tels que basket et volley ball, et surtout natation.

Au sein d'un complexe sportif léger (une salle de musculation) des séances de gymnastique appropriée réunissent les pilotes. Des exercices posturaux et d'élongation vertébrale, des exercices musclants intéressant la ceinture abdominale, les muscles fessiers et dorsolombaires sont dirigés par un moniteur ayant suivi un enseignement particulier de gymnastique vertébrale. Cette prophylaxie par la kinésithérapie peut être valable que si le pilote et leur commandement sont persuadés de son utilité.

2. Le flight surgeon par une action psychologique bien adaptée, s'intéressera aux problèmes de détection des signes de fatigue opérationnelle, état pathologique à partir duquel le pilote moins efficace, moins vigilant, risque l'accident. Le Médecin se préoccupera, en étroite collaboration avec le commandement, de la répartition de l'activité aérienne.

3. L'examen radiologique d'aptitude (Cf chapitre 7) devra être particulièrement sévère pour éliminer toute affection susceptible de s'aggraver sous l'influence des facteurs nocifs du vol (posture et vibration) (61)(63)(75)(76).

CONCLUSION

Les algies vertébrales des pilotes d'hélicoptère constituent une entité clinique très intéressante qui persiste malgré les importants progrès enregistrés dans la technologie aéronautique (niveau vibratoire moindre, amélioration des conditions du pilotage). Les médecins de l'aéronautique devront ces prochaines années suivre le devenir de ces pilotes. Il faut reconnaître que trop souvent, ces pilotes ne rencontrent pas, près des experts chargés d'émettre un avis en vue d'indemniser leur affection vertébrale, une compréhension de leurs problèmes.



Figure 191 :

Siège pilote de la Gazelle

6.2. LA COLONNE CERVICALE DES PILOTES D'AVIONS DE COMBAT

R.P. DELAHAYE, R. AUFFRET

Sommaire

6.2.1. GENERALITES

6.2.2. LES ETUDES SUR LA COLONNE CERVICALE DES PILOTES

1. Armée de l' Air Française (1958.1962)
2. Armée de l' Air Hollandaise (1960)
3. Armée de l' Air Tchèque (1960)
4. Armée de l' Air Suisse (1962)
5. Armée de l' Air Française (1967.1979)

6.2.1. GENERALITES

Les pilotes des avions de chasse à haute performance se plaignent parfois de cervicalgies au cours des vols à basse altitude, le niveau vibratoire est particulièrement élevé et le pilote est souvent penché en avant en attitude figée.

S'agit-il d'une maladie professionnelle ?

Nous disposons depuis 20 ans de plusieurs études entreprises dans des Armées de l' air et il apparaît nécessaire de rédiger une mise au point qui tiendra compte des modifications des caractéristiques du travail aérien, notamment sur les avions de combat à haute performance (Mach 2).

6.2.2. LES ETUDES SUR LA COLONNE CERVICALE DES PILOTES

6.2.2.1. Armée de l' Air Française (1958-1962)

a) J. Saïfs (1958.1962) attire l'attention sur la présence d'anomalies radiologiques visibles au niveau du rachis cervical des pilotes d'avions de chasse (réacteurs subsoniques). Il insiste sur l'influence de l'important travail statodynamique auquel est soumis la colonne cervicale du pilote. Par des examens radiologiques, statiques (face et profil) et dynamiques (de profil), J. Saïfs (199)(200) trouve 111 examens normaux sur 228 pilotes d'âge moyen 25,4 ans. Les 121 examens pathologiques (52%) comprennent 116 cas de modification de la courbure lordotique appréciée par la Méthode d' Arlet (76)(fig 455) et 5 cas d'arthrose C2.C3, 1 cas C5.C6, 3 cas et C6.C7 1 cas. Ces dysharmonies de courbure - rectitude ou inversion - sont parfois associées à des décalages vertébraux à une limitation de l'extension. J. Saïfs estime qu'il y a une corrélation entre les dysharmonies de courbure et le travail aérien.

b) R.P. Delahaye et P. Edouard (52)

Mais le travail pour intéressant qu'il soit demandait à être confirmé par une étude comparative d'un lot-témoin, non soumis au travail aérien et de même répartition d'âge.

R.P. Delahaye et P. Edouard, dans une étude non publiée, ont analysé 120 radiographies de la colonne cervicale de pilotes de chasse (1959-1962). Ils retrouvent, sur les examens statiques, plus de 60% de dysharmonies de courbure chez des sujets âgés de 20 à 30 ans, alors qu'un groupe de 120 sujets du même âge non exposé aux risques aériens et sans antécédents traumatiques ne présente que 5% d'anomalies de courbure. Il n'avait pas été pratiqué d'examens radiologiques dynamiques. De plus, très rapidement, on s'est aperçu que le plan buccal n'étant pas horizontal, apparaissaient des modifications de la statique rachidienne de profil. Les critères de réussite d'un cliché de profil ayant été précisés, permirent de retrouver pratiquement le même pourcentage dans les deux lots.

6.2.2.2. Armée de l' Air Hollandaise (1960)

S. BOTENGA, R.J. HAMBURGER et J.G. PFISTER (1960)(128)(126) partant de la publication de J. Saïfs réalisent une importante étude statodynamique des lésions du rachis cervical chez des pilotes de chasse (Centre National de Médecine Aéronautique de Soesterberg, Pays Bas).
Ont été examinés :

- 100 pilotes d'avions à réaction, d'âge environ 27,5 ans en moyenne (groupe A)
- 100 pilotes d'avions conventionnels d'âge moyen 26,1 ans (groupe B)

-100 candidats pilotes d'âge moyen 20,7 ans (groupe C).

Tous ces sujets sont en bonne santé apparente sans antécédents traumatiques vertébraux. La technique employée comprend des radiographies en incidences face, de profil dans une attitude normale, de profil en hyperextension maximale, de profil en hyperflexion maximale.

R.J. Hamburger et J.C. Pfister (126) recherchent des signes d'arthrose, étudient les anomalies de courbures. Ils mesurent la mobilité de la colonne cervicale selon une technique personnelle schématisée, (figure 191).

Anomalies de courbure classées en R (rectitude)

L (lordotique), C (cyphotique)

	: GROUPE A	: GROUPE B	: GROUPE C	: TOTAL
R	: 42	: 35	: 26	: 103
L	: 51	: 55	: 65	: 171
C	: 7	: 10	: 9	: 26
Total examens	: 100	: 100	: 100	: 300

Tableau 6-4

Les différences trouvées ne sont pas significatives.

- Mobilité de la colonne cervicale -

Les auteurs néerlandais envisagent l'étude de la mobilité globale du rachis cervical par méthode statistique en comparant l'hyperextension, l'hyperflexion et la mobilité totale dans chacun des groupes A,B,C.

Ils concluent :

le groupe C (candidats pilotes) a une mobilité totale plus grande que les groupes A et B provenant surtout d'une hyperextension plus forte ; le groupe B (avions conventionnels) présente une moindre hyperextension mais par contre une flexion plus importante. La mobilité totale est conservée.

Donc R.J. Hamburger et J.C. Puister infirment les résultats trouvés par J. Safs. Dans le travail des auteurs néerlandais, il faut remarquer que l'âge de la population référence est relativement plus bas que celui des pilotes. Ils ne trouvent pas de différence pour la répartition de l'arthrose.

6.2.2.3. Armée de l' Air Tchèque (1962)

J. VOLEK (243) rencontre chez les pilotes un taux d'arthrose supérieur à 10% à celui d'une population normale du même âge. Il invoque les micro-traumatismes des accélérations et des vibrations prolongées.

6.2.2.4. Armée de l' Air Suisse (1962)

N. Geschwend, E. Loder (102) publient une étude clinique et radiologique de la colonne vertébrale chez 70 pilotes militaires âgés de 21 à 46 ans, ayant de 233 à 4700 heures de vol. Ils trouvent un rachis sans anomalie clinique ou radiologique dans 50,7% des cas et pathologique dans 49,3%. Parmi 26 pilotes se plaignant du cou ou des épaules, ils n'en trouvent que 8 ayant une courbure normale de la colonne cervicale.

6.2.2.5. Armée de l' Air Française (1967.1979)

A la suite des différentes études radiologiques, nous nous sommes posés la question suivante : Faut-il rattacher à leur profession les anomalies de courbure ou les signes arthrosiques du rachis cervical des pilotes ? Il s'agit d'études longues nécessitant une parfaite connaissance des variations rencontrées ces dernières années dans l'anatomie radiologique normale du rachis. D'autre part, la confrontation avec un groupe témoin et une étude statistique rigoureuse sont obligatoires.

I. G. Gueffier, R.P. Delahaye (54)(55)(115) étudient les particularités de l'examen radiologique dynamique du rachis cervical chez 103 membres du personnel navigant comparés statistiquement à une population normale de référence.

Ce travail préliminaire utilisant les mensurations de la méthode décrite par R.G. Hamburger et J.G. Puister (126) conclut provisoirement qu'un certain nombre de faits sont plus fréquents dans le personnel navigant : dysharmonie de courbure, rectitude, arthrose. Mais il est nécessaire de poursuivre ces études.

2. Ultérieurement, en 1972 et en 1976, nous avons repris le même protocole en comparant chaque fois 100 pilotes d'escadres de chasse avec un lot de 100 témoins du même âge. Le travail s'échelonnant sur 8 ans n'a pas permis de déceler une différence entre le groupe de pilotes et le groupe témoin.

CONCLUSION :

Des études échelonnées dans le temps sont nécessaires pour poursuivre ce bilan du rachis cervical des pilotes d'avions de combat surtout avec la mise en oeuvre de nouveaux appareils de combat où les accélérations de grande amplitude seront plus nombreuses. Pour le moment, il n'est pas possible d'affirmer avec certitude que le vol sur avions rapides de combat favorise l'apparition de l'arthrose cervicale.

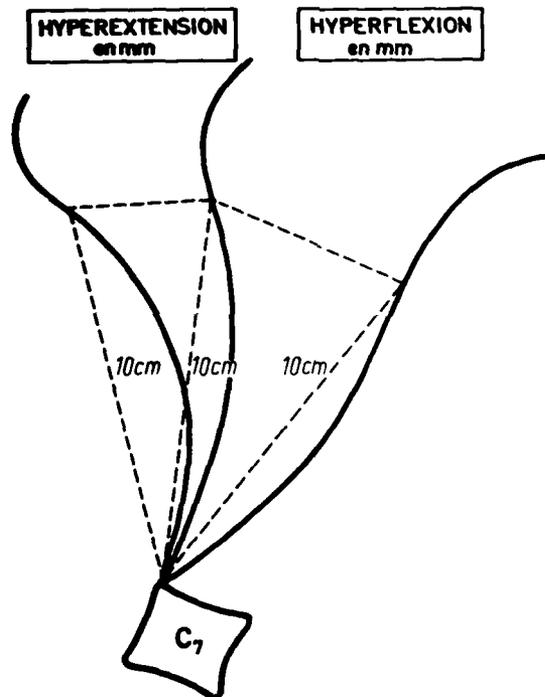


Figure 192 : Etude de la mobilité du rachis cervical
d'après HAMBURGER et PUISTER (126)

CHAPITRE 7 : APTITUDE AU PERSONNEL NAVIGANT ET

RACHIS

R.P. DELAHAYE, R. AUFFRET, G. LEGUAY,

P. DOURY, P.J. METGES, C. KLEITZ

S O M M A I R E

7.1. ADMISSION

- 7.1.1. Examen clinique
- 7.1.2. Examen radiologique d'aptitude
 - 7.1.2.1. But de cet examen
 - 7.1.2.2. Technique utilisée
- 7.1.3. Troubles statiques du rachis
 - 7.1.3.1. Les troubles statiques dans le plan frontal
 - . Attitude scoliotique
 - . Scoliose
 - 7.1.3.2. Les troubles statiques dans le plan sagittal
 - . Lordose cervicale
 - . Cyphose dorsale
 - . Lordose lombaire
- 7.1.4. Les séquelles d'épiphysose vertébrale (Maladie de Scheuermann)
 - 7.1.4.1. Fréquence
 - 7.1.4.2. Signes radiologiques élémentaires
 - 7.1.4.3. Rapport des séquelles d'épiphysose avec le traumatisme
 - 7.1.4.4. Classement des lésions séquellaires
- 7.1.5. Les anomalies congénitales du rachis
 - 7.1.5.1. La déhiscence des apophyses épineuses
 - 7.1.5.2. Les anomalies transitionnelles de la charnière lombo-sacrée
 - 7.1.5.3. La spondylolyse et les spondylolisthésis
 - 7.1.5.4. Les blocs congénitaux
 - 7.1.5.5. Les altérations dues à un trouble du développement d'un corps vertébral
 - 7.1.5.6. Les malformations congénitales complexes.
- 7.1.6. Les affections acquises
- 7.1.7. Les causes d'inaptitude déterminées par l'expertise clinique et radiologique
 - 7.1.7.1. Les causes d'inaptitude communes à tous les emplois de pilotes
 - 7.1.7.2. Les causes d'inaptitude spécifique au pilotage d'avion de combat
 - 7.1.7.3. Les causes d'inaptitude spécifique au pilotage d'hélicoptère

7.2. VISITES REVISIONNELLES

- 7.2.1. Les fractures et les traumatismes du rachis
 - 7.2.1.1. Fractures du rachis dorsolombaire
 - 1. Fracture comminutive
 - 2. Fractures simples par tassement
 - 7.2.1.2. Fractures du rachis cervical
 - 7.2.1.3. Fractures des apophyses transverses
 - 7.2.1.4. Traumatismes du rachis sans fractures
- 7.2.2. Ostéoarthrites vertébrales
 - 7.2.2.1. Ostéoarthrite tuberculeuse
 - 7.2.2.2. Ostéoarthrites (méritococciques, staphylococciques)
- 7.2.3. Arthrose
- 7.2.4. Spondylarthrite ankylosante
- 7.2.5. Interventions chirurgicales
 - 7.2.5.1. Laminectomie
 - 7.2.5.2. Cure de hernie discale
 - 7.2.5.3. Cure de spondylolisthésis
- 7.2.6. Le problème de la répétition des éjections

L'étude de la nocivité des facteurs du vol et les analyses des différentes statistiques confirment que la colonne vertébrale est soumise à un certain nombre d'agressions plus ou moins importantes au cours de la carrière du personnel navigant. Il apparaît nécessaire de déterminer des critères d'aptitude concernant le rachis selon le type d'appareil employé.

Ces conditions d'aptitude sont envisagées sous deux aspects bien particuliers :

- l'aptitude à l'admission au personnel navigant,
- l'aptitude au cours des visites révisionnelles et après accident aérien.

7.1. L'ADMISSION AU PERSONNEL NAVIGANT

7.1.1. Examen clinique /

Cet examen devra répondre aux exigences définies au paragraphe 5-4 et insistera plus particulièrement sur le bilan de la musculature péri-rachidienne, sur la détection clinique des scoliozes, des accentuations de la cyphose, des inégalités de longueur des membres inférieurs.

7.1.2. Examen radiologique d'aptitude /

7.1.2.1. But de cet examen : Actuellement, tous les candidats au P.N. de l'Armée de l'Air Française subissent obligatoirement un examen radiologique de l'ensemble du rachis. Le rôle de ce dossier de référence est triple (18)(48)(52)(76)

1°) élimination des lésions graves susceptibles de modifier la résistance vertébrale et incompatibles avec le travail aérien.

2°) Etude de la pathologie professionnelle

3°) Comparaison éventuelle avec un examen effectué après traumatisme (éjection, accident aérien). A ce propos, il faut insister sur l'intérêt de définir des délais d'archivages suffisants dans les centres d'expertise médicale du personnel navigant pour que ces comparaisons puissent effectivement être possibles, 10, voire 15 ans après la visite d'admission.

La plupart des experts d'autres armées de l'Air européennes reconnaissent l'intérêt de cet examen (14)(18)(249)(250). Certains organismes (RAF, USAF) estiment cependant que l'examen radiologique du rachis ne s'impose pas pour les raisons suivantes (9) :

- augmentation de l'irradiation du personnel navigant,
- absence d'incidence sérieuse sur l'avenir aéronautique des candidats.

Personnellement, cette position ne nous paraît pas logique :

- il existe de nombreuses affections acquises ou des anomalies congénitales sans manifestations cliniques qui peuvent affaiblir la résistance vertébrale et modifier sur le rachis la répartition des forces d'inertie apparaissant au cours de certains accidents (éjections en particulier).

- l'absence de dossier de référence toujours utile pour sauvegarder les intérêts de l'Etat et des pilotes sur le plan médico-légal doit être souligné.

- Si l'examen radiologique systématique à l'admission n'est pas pratiqué, il apparaît impossible d'entreprendre des études scientifiques sérieuses de la pathologie professionnelle du P.N. et du vieillissement du rachis. De plus, nous n'aurions pas pu décrire dans plusieurs travaux l'évolution des aspects radiologiques normaux de la colonne vertébrale du jeune et insister sur la nécessité d'adapter les positions de l'expert à ces variations (56)(58).

- L'irradiation subie par le P.N. à l'admission reste faible. Dans l'état actuel des connaissances scientifiques, il est vraisemblable qu'elle ne peut constituer un danger radiobiologique. En effet, il faut tenir compte dans la balance : bénéfice-inconvénient, des avantages recueillis par la pratique de l'examen radiologique, ils sont indéniables.

Cette position reposant sur une expérience de plus de 20 ans de pratique de soins, d'expertises du personnel navigant français, militaire ou civil, n'est pas adoptée unanimement. Dans les différents pays de l'O.T.A.N., il n'y a pas communauté de vues sur l'opportunité de pratiquer un examen radiologique systématique du rachis lors de la visite d'admission (voir tableau 7-1) (9)

: Examen radiologique : : systématique :		REMARQUES
USAF	: Non	: .Pratiqué s'il existe des antécédents ou s'il y a suspicion clinique
US Army	: Oui (?)	: .Pour détecter spondylolyse ou spondylolisthésis ou s'il y a notions cliniques
FAF	: Oui	: .Ensemble du rachis admission seulement
GAF	: Oui	: .Ensemble du rachis (à l'admission et 5 ans après)
HAF	: Oui	: .Colonne dorsale et lombaire
IAF	: Oui	: .Ensemble du rachis
RAF	: Non	:

TABLEAU 7-1

7.1.2.2. Technique utilisée :

L'ensemble du rachis est exploré en deux incidences : face et profil.

Deux techniques sont employées :

- clichés d'ensemble du rachis (holorachis)
- clichés segmentaires.

a) Les clichés d'ensemble du rachis (9)(19)(116)(285)

La technique de la panradiographie utilise deux films de format 30 x 90 cm avec écrans renforçateurs dégressifs compensant les différences d'opacité des segments cervical, dorsal, lombaire. Cette technique est la plus employée mais il est possible en plaçant près de la fenêtre d'émission du tube à rayons X, un filtre mobile d'obtenir un résultat identique, au prix d'une augmentation discrète de l'irradiation. Deux clichés (face et profil) sont pris sur un sujet debout, pieds nus avec une distance foyer-film égale à 3 mètres. Les radiographies incluent dans leur surface d'examen la partie inférieure du crâne, le rachis et la totalité du bassin. La statique peut être déterminée. Cette méthode suffit le plus souvent pour la constitution du dossier de référence mais il faut noter chez des sujets corpulents la nécessité de recourir à des techniques segmentaires pour une étude fine de la structure vertébrale.

b) Les clichés segmentaires (52)(76)

L'examen radiographique comprendra 8 clichés au minimum.

1. Le cliché lombo-pelvi-fémoral (incidence de face) pieds en rotation interne de 20° incluant les toits des cotyles et effectués en postéro-antérieur (288).
2. Un cliché de profil du rachis lombaire
3. Une incidence de face localisée sur le disque L5.S1. L'inclinaison du rayon étant fonction de l'obliquité du disque apprécié sur le cliché de profil.
- 4.5. Des clichés face et profil colonne dorsale (287)
Pour l'incidence, de profil, le sujet aura les bras repliés haut devant lui (coudes au contact, avant-bras en avant de la face). Il ne se placera pas en position de skieur nautique afin de ne pas créer une augmentation de la cyphose dorsale physiologique.
- 6.7. Des clichés de face de la colonne cervicale
8. Un cliché atlas-axis bouche ouverte.

Notons que ce dernier cliché se pratique en plus avec 2 panradiographies face et profil.

Les examens complémentaires

A la demande des clichés complémentaires seront pratiqués.
Des radiographies en décubitus permettront d'étudier la réduction éventuelle d'une attitude scoliotique décélée sur le cliché debout.
Des clichés localisés sous diverses incidences (face, profil et éventuellement obliques) des tomographies frontales et sagittales sont nécessaires pour étudier une malformation congénitale.
Les clichés dynamiques rechercheront les blocs fonctionnels ou étudieront les pincements discaux latéralisés. Les techniques nécessitant des moyens de contraste (radiculoscographie, myélographie) ne sont pas utilisées dans le cadre de la visite d'admission au personnel navigant et dans les visites de contrôle .

L'examen des radiographies par le radiologiste lui permet de formuler un standard chiffré d'aptitude. Il tiendra toujours compte de la valeur de la musculature du sujet et des données de l'examen clinique.

7.1.3. Les troubles statiques du rachis /

Ces anomalies statiques se rencontrent dans les deux plans frontal (visibles sur l'incidence de face) et sagittal (sur le profil).

7.1.3.1. Les troubles statiques dans le plan frontal

Des modifications de la statique siègent à la colonne dorsale et à la colonne lombaire. Pendant de très nombreuses années, la détermination de la normalité a été basée sur le principe suivant : une verticale abaissée par la protubérance occipitale externe passant par les différentes apophyses épineuses aboutit à la pointe du coccyx. Mais, les conditions de prise de clichés (station verticale) et peut-être une évolution des caractères radiologiques de la normalité modifient profondément ce point de vue. Seuls, 25% des sujets examinés debout répondent à la définition ancienne de la normalité (DELAHAYE et Coll) (56)(58)(76)(289)(290)(291).

Il faut donc admettre une nouvelle normalité statistique qui fait intervenir les données établies à partir de l'inventaire précis de 3500 rachis de l'adulte jeune (289)(290)(291). Nous avons fixé à 10° l'angle scoliotique limite entrant dans le cadre de la normalité "élargie" (56)(58)(60)(179).

On décrit deux types de modifications de la statique vertébrale dans le plan frontal :

- l'attitude scoliotique,
- la scoliose.

1. L'attitude scoliotique (figure 193) fait apparaître une ou plusieurs courbures rachidiennes. Elle est le plus souvent secondaire à une inégalité de longueur des membres inférieurs se révélant sur l'incidence de face par l'existence d'un déséquilibre pelvien.

L'attitude scoliotique, comme la scoliose, peut être en rapport avec une inclinaison du plateau sacré sur l'horizontale, avec une asymétrie du corps de L5. Cette attitude scoliotique se caractérise sur les clichés de face par une inflexion de la ligne des épineuses. Deux éléments importants doivent être retrouvés :

- l'absence de rotation des corps vertébraux ;
- la réductibilité du discret trouble en décubitus.

2. La scoliose essentielle :

variété la plus fréquente, elle revêt deux types principaux :

- la petite scoliose commune généralement bénigne,
- la maladie scoliotique plus grave.

a) La petite scoliose commune se développe dans l'enfance et aboutit à la création de courbures rachidiennes anormales avec rotation des corps vertébraux. Elle entraîne généralement l'apparition d'une gibbosité dysesthésique.

On définit à la limite de chaque courbure les vertèbres neutres. Ce sont les vertèbres les plus inclinées sur l'horizontale dont les apophyses épineuses sont à peu près centrées sur la projection du corps vertébral. La vertèbre sommet est la plus inclinée sur l'horizontale. Elle présente la rotation de degré le plus accentué. Son apophyse épineuse se projette en dedans dans la concavité. Toute scoliose doit être mesurée et nous utilisons la méthode de COBB pour calculer l'angle scoliotique (figure 194).

On prolonge la ligne du plateau supérieur de la vertèbre neutre supérieure et celle du plateau inférieur de la vertèbre neutre inférieure. Pour des commodités de construction l'angle formé par les deux perpendiculaires à ces lignes définit l'angle scoliotique de la courbure considérée.

Afin de limiter l'erreur de mesure, l'usage d'un papier calque et d'un crayon fin sont recommandés. Il est intéressant d'examiner les crêtes iliaques et de rechercher leur soudure (test de Risser) qui permet d'affirmer l'arrêt de l'évolutivité de la scoliose. Rappelons la nécessité de rechercher, comme pour l'attitude scoliotique, une inégalité de longueur des 2 membres inférieurs créant une bascule du bassin, une asymétrie du corps de L5, une obliquité du plateau sacré.

b) La maladie scoliotique évolue jusqu'à la fin de la croissance. L'angle scoliotique est souvent important. Les sujets porteurs de cette variété de scoliose sont toujours inaptes au service national et à fortiori aux emplois de personnel navigant militaire.

3. Les scoliose de cause connue : les radiographies décèlent la présence d'anomalies congénitales majeures : hémicorps, surnuméraire, hémivertèbre surnuméraire le plus souvent, hypoplasie ou aplasie plus rarement. L'angle de ces scoliose fréquemment important (plus de 40°-50°) atteint exceptionnellement des valeurs comprises entre 10° et 20°. De plus, la présence d'anomalies majeures oblige d'émettre une décision d'aptitude.

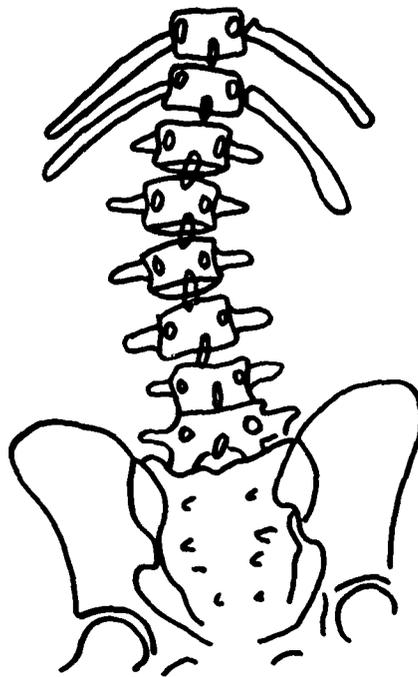


Figure 193 : Attitude scoliotique lombaire par déséquilibre pelvien.
Absence de rotation des corps vertébraux, réductibilité
par talonnette ou décubitus

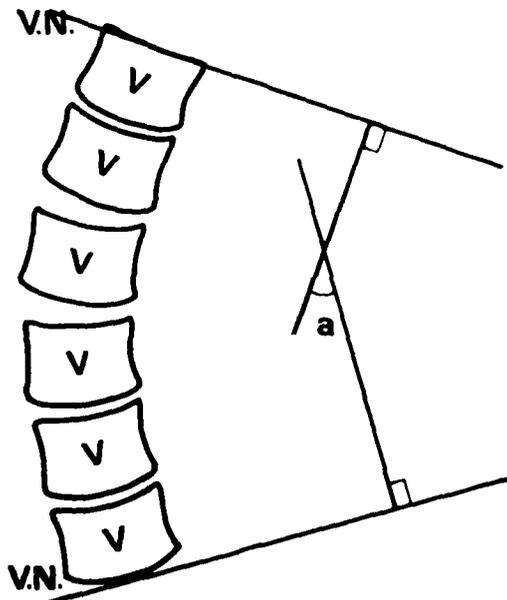


Figure 194 : Mesure de l'angle scoliotique (d'après COBB)
VN = vertèbre neutre
VS = vertèbre sommet

7.1.3.2. Les troubles statiques dans le plan sagittal

Dans le plan sagittal, le rachis présente 3 courbures successives analysables sur les clichés de profil et résultant de l'adaptation de l'homme à la position debout. Les courbures augmentent la résistance vertébrale. Elles dépendent de divers facteurs dont beaucoup sont extra-osseux (facteurs ligamentaires et musculaires). La normalité est basée sur le fait qu'un fil à plomb qui se projette sur le conduit auditif externe doit passer par le milieu du disque L5 S1, et en regard du grand trochanter. Chaque étage cervical, dorsal, lombaire, présente donc un certain degré de courbure qu'il convient de mesurer pour apprécier et chiffrer éventuellement le trouble statique.

1. La lordose cervicale

Nous utilisons la méthode décrite par J. ARLET (figure 195). Nous traçons une droite tangente au bord postérieur de l'apophyse odontoïde et en rejoignant l'angle postéro-inférieur de C7. La flèche de cette lordose est la perpendiculaire tracée à partir de l'angle postérieur et inférieur de C4. Cette mesure n'a de valeur que si elle est effectuée sur le cliché de profil neutre (plan occipito-occlusal horizontal). Il apparaît intéressant de classer la lordose d'après le rapport C/F. C exprimé en centimètres mesure la corde. F (en mm) représente la flèche de lordose. Normalement, ce rapport est voisin de 1. L'hyperlordose se traduit pour des valeurs inférieures à 0,8. En pratique, le rachis cervical se caractérise par une certaine souplesse. Exceptionnellement, un trouble statique cervical intervient dans la détermination d'une aptitude au Personnel Navigant.

2. La cyphose dorsale s'apprécie par l'angle au centre (287).

Cet angle est déterminé par l'intersection de la droite parallèle au plateau inférieur de D11 et de la droite parallèle au plateau supérieur de D4 (figure 196). Ces 2 lignes en se coupant en avant forment un angle aigu. D4 et D11 ont été choisis comme vertèbre de référence car les vertèbres extrêmes sont le plus souvent masquées sur les clichés. En pratique, l'angle au centre se mesure plus facilement en traçant les perpendiculaires aux deux droites parallèles, l'une au plateau inférieur de D11, l'autre au plateau supérieure de D4. Cette mesure ne se conçoit que si les conditions techniques de prise de la radiographie sont parfaites. En particulier, il faut rappeler que la position du skieur nautique augmentant la cyphose dorsale physiologique doit être interdite. L'angle au centre chez un sujet normal varie de 30° à 35°.

3. La lordose lombaire (76)(288)(291)

Au niveau de la colonne lombaire, il est très difficile d'obtenir par des mesures mathématiques une idée de la normalité. Aussi, de nombreuses mesures ont été proposées. Nous avons systématiquement pendant plusieurs années, effectué un grand nombre de mesures sur la colonne lombaire et nous avons rapporté les résultats de cette étude assez décevante en 1973 (291), exploitation rendue facile par l'emploi de l'informatique.

Aucune mesure à elle seule ne définit la lordose, il faut donc employer plusieurs repères chiffrés facilement reproductibles (288)(291).

1°) L'angle sacro-vertébral formé par les tangentes à la face antérieure de L5 et à la face antérieure de S1 (figure 197)
Sa valeur normale est 129°, 95% des valeurs se situent entre 110° et 147°.

2°) L'inclinaison sur l'horizontale de la plateforme sacrée est en moyenne de 30° (figure 198)

3°) La flèche de lordose ne tient pas compte de la position du sacrum (288)(291)
La corde de lordose joint le coin postérieur et supérieur de L1 au coin postérieur et supérieur du corps de S1. La mesure de la flèche de cet arc s'effectue en L3 (figure)
Sa valeur moyenne est de 19 mm avec un écart type de 6 mm (fig. 197)

4°) L'indice de renversement (288)(291) : il faut tenir compte de :
- la verticale abaissée de l'angle postérieur et supérieur du corps de L1,
- l'horizontale passant par l'angle postérieur et supérieur du corps de S1,

L'indice de renversement se mesure (fig 198) :

- soit par la distance séparant l'angle postéro-supérieur du corps de S1 avec l'intersection de la verticale abaissée de l'angle postéro-supérieur de L1 et de l'horizontale passant par l'angle postéro-supérieur de S1.

- soit par l'angle formé par la corde lombaire avec la verticale définie précédemment passant par le bord postéro-supérieur de L1.

L'angle moyen caractérisant l'indice de renversement est de 6° 30' avec un écart type de 9°, ce qui indique une grande dispersion autour de la valeur moyenne.

La multiplicité des mesures dans le plan sagittal rend compte de la difficulté d'appréciation numérique de la statique sagittale lombaire (288)(291).

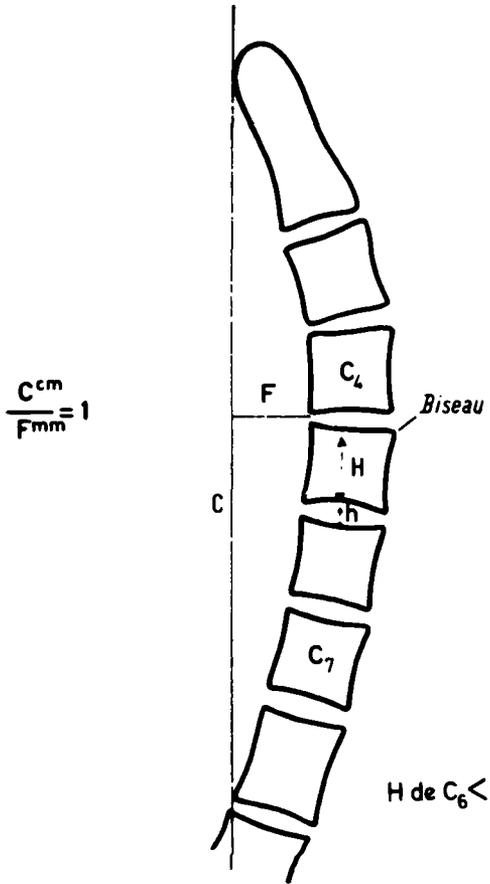


Figure 195 : Mesure de la lordose cervicale (d'après ARLET)

$$\frac{C_{cm}}{F_{cm}}$$

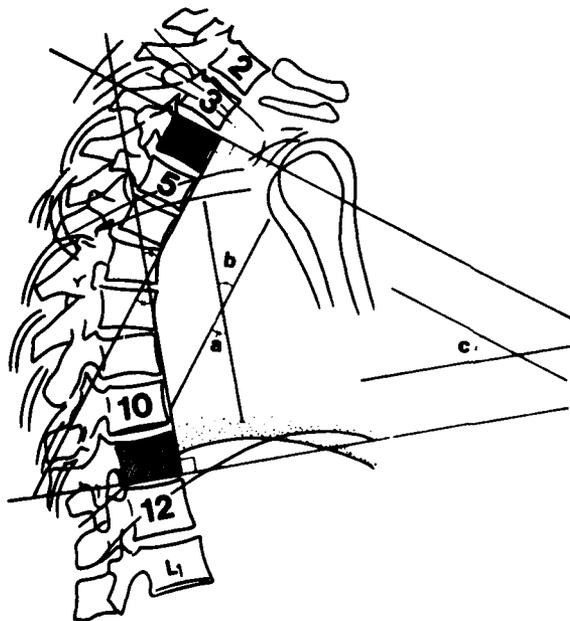


Figure 196 : Mesure de la cyphose dorsale valeur normale : 30-35°

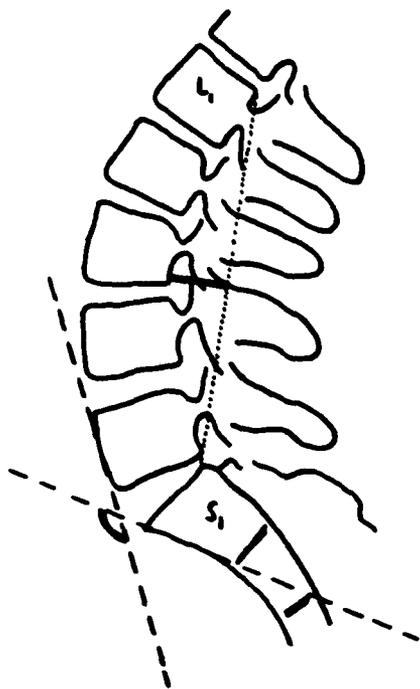


Figure 197 : Angle sacrovertébral et flèche de lordose.

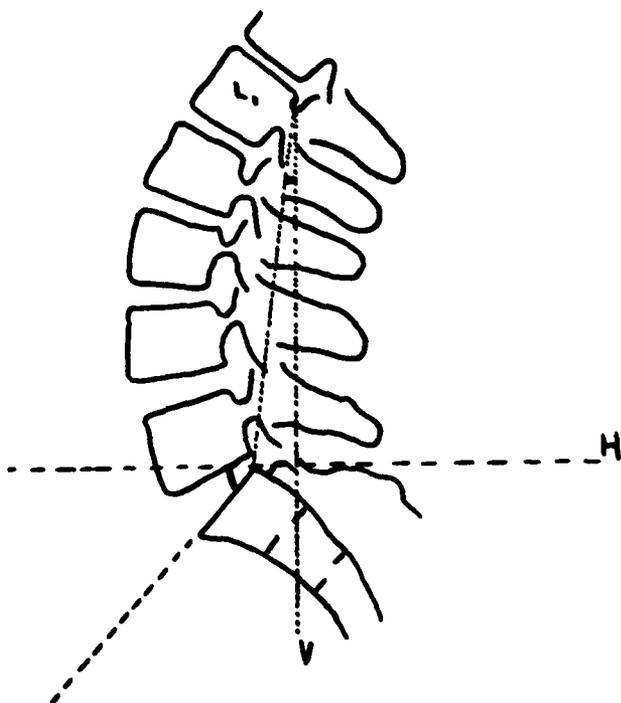


Figure 198 : Inclinaison sur l'horizontal du plateau sacré et indice de renversement.

7.1.4. Les séquelles d'épiphysose vertébrale (Maladie de Scheuermann) /
(76)(203)(319)

La maladie de Scheuermann est une ostéonécrose du listel vertébral qui se développe au cours de la croissance. On parle de séquelles dès que le listel marginal est soulé (16,18 ans).

Du fait de la fréquence de ces séquelles et de leur grand polymorphisme, les positions des experts n'ont pas toujours été identiques dans l'appréciation de l'aptitude. Nous avons pensé, dans le cadre de ce mémoire, qu'il serait opportun de rappeler un certain nombre de données statistiques et de décrire soigneusement la séméiologie radiologique. Cette position nous paraît d'autant plus légitime que les aspects des séquelles d'épiphysose vertébrale sont rarement étudiés ou exposés en détail au cours des études médicales.

7.1.4.1. Fréquence

Nous avons établi deux statistiques (tableau 7-2)

	LIEU	NATURE	% des séquelles
I	C.P.E.M.P.N. Paris	2500 candidats PN	12,08
	H. Mangin, G. Gueffier	Aviation Militaire	
	P.J.Metgès,	19.23 ans	
	R.P.Delahaye		
II	H.I.A. BEGIN, St Mandé	2500 militaires	12,75
	R.P.Delahaye, P.J.Metgès		
	C.Kleitiz		
	1971 - 1978		

TABLEAU 7 - 2

Les résultats complets de ces statistiques I et II figurent dans l'annexe publiée page 282 à page 285.

La fréquence apparaît constante depuis 1969 (12% de la population étudiée). Elle est nettement inférieure à celles observées en Suède (25 à 30%) et aux USA (25%)

7.1.4.2. Les signes radiologiques élémentaires associent des anomalies statiques du rachis et des anomalies morphologiques des corps vertébraux et des interlignes (319).

1°) Les anomalies statiques souvent présentes ne sont pas constantes. Elles comprennent l'hypercyphose et la scoliose.

L'hypercyphose dorsale basse (angle supérieur à 35°) est le trouble statique le plus souvent rencontrée dans les statistiques personnelles (55% des cas). Cette hypercyphose centrée sur D8 D9 est toujours en corrélation avec la prédominance des lésions à cet étage du rachis.

La scoliose : le type le plus fréquemment rencontré à un angle scoliotique inférieur à 20°.

Les cyphoscolioses sont assez fréquentes (30%)

2°) Les anomalies morphologiques des corps vertébraux et des interlignes

Le tableau récapitulatif ci-dessous indique les principaux signes radiologiques visibles au niveau du rachis.

- Anomalies des plateaux
- Encoches nucléaires
 - . Empreinte nucléaire
 - . Hernie intraspongieuse
 - . Hernie rétromarginale antérieure
- Anomalies du listel marginal
- Déformations des corps vertébraux
- Altérations de l'interligne
- Blocs vertébraux

Les anomalies des plateaux

L'aspect feuilleté des plateaux intéresse surtout le plateau inférieur, plus rarement le plateau vertébral supérieur. Ces lésions mieux analysables sur le cliché de profil siègent au niveau de la zone d'hypercyphose (D8 D9). Selon les cas, les plateaux sont épaissis, feuilletés, en stades successives, ondulés, godronnés, déchiquetés ou crénelés. Leurs contours bien qu'irréguliers ne sont pas flous mais souvent condensés. Assez souvent, deux plateaux adjacents sinueux séparés par un disque aminci semblent se modeler l'un sur l'autre (signe du Puzzle des auteurs anglo-saxons).

On peut décrire des plateaux discrètement irréguliers dans 74% des cas observés dans nos deux statistiques, très irréguliers dans 15% des cas et réguliers dans 10% des cas de séquelles de maladies de Scheuermann.

Les encoches nucléaires :

Elles comprennent les empreintes nucléaires, les hernies intraspongieuses et les hernies rétromarginales antérieures.

- L'empreinte nucléaire se présente sous forme d'une encoche à large rayon de courbure au niveau de la moitié postérieure du plateau vertébral. Elle est habituellement soulignée par une bande plus ou moins épaisse de condensation. L'atteinte de deux plateaux adjacents confère au disque un aspect biconvexe. Cette lésion isolée très fréquemment rencontrée ne semble pas devoir être considérée comme pathologique.

- La hernie intraspongieuse (nodule de SCHMORL) siège surtout au niveau du plateau vertébral inférieur, préférentiellement entre D7 et L1 (pratiquement toujours dans la zone d'hypercyphose). Le plus souvent médiane, rarement paramédiane, ce nodule de Schmorl se présente sous la forme d'une lacune ouverte en demi-cercle de 5 mm de profondeur sur 20 mm de large avec un angle de raccordement progressif avec le plateau vertébral. Les bords nets sont entourés d'un liseré de condensation.

De profil, cette lacune se situe de préférence à l'union du tiers moyen et du tiers postérieur du plateau, surtout dans les localisations dorsales très évoluées avec d'importantes séquelles (tassement cunéiforme en particulier). L'association à un aspect feuilleté des plateaux n'est pas exceptionnelle.

- Les hernies rétromarginales antérieures (H.R.M.A.) siègent préférentiellement au niveau lombaire et presque toujours sur le plateau supérieur de la vertèbre.

Sur l'incidence de profil, classiquement c'est une encoche rétromarginale antérieure présentant une pente douce en arrière et dont la partie antérieure au contraire est le plus souvent verticale.

Plus rarement, elle présente une forme symétrique. Elle s'accompagne parfois d'une diminution globale de la hauteur du disque intervertébral. Parfois, on note une excroissance ostéophytique en avant du rebord vertébral.

Cette H.R.M.A. variété d'une hernie intraspongieuse, possède souvent une grande taille. Associée le plus souvent aux autres signes des séquelles de la maladie de Scheuermann, elle peut être aussi isolée.

Les anomalies du listel marginal

Sont représentées essentiellement par l'absence de soudure des coins vertébraux. C'est l'épiphysaire libre ou paradiscal défect des auteurs anglo-saxons. Elle siège fréquemment au coin antérieur et supérieur du corps vertébral plus rarement au coin inférieur. Elle se traduit sur le cliché de profil par un trait clair, large, situé à la base d'implantation d'un ou plusieurs angles. Il est rare que ce coin antérieur détaché s'inscrive dans les contours du corps vertébral. Il est soit petit, atrophique voire punctiforme, soit trop gros par excès de croissance et débordant les contours vertébraux.

Nous estimons que cet aspect n'est pas spécifique des séquelles d'une maladie de Scheuermann.

Les déformations des corps vertébraux

Fréquemment, il existe une diminution de hauteur de la partie antérieure des corps vertébraux. Dans certains cas, la déformation est minime, les plateaux supérieur et inférieur de la vertèbre ne sont plus parallèles. Ils s'inclinent en pente douce vers l'avant. Il existe de nombreuses variantes de cette image allant de l'aspect trapézoïdal à la platyspondylie modérée si le corps vertébral est de faible hauteur dans son ensemble. Le plus souvent, c'est aux dépens de la partie antérieure des corps vertébraux, que s'effectue cette déformation avec une pente relativement régulière d'arrière en avant. Cette déformation à coin antérieur intéresse généralement plusieurs vertèbres et prédomine au centre de la scoliose. Fréquemment, on observe un allongement antéro-postérieur du corps vertébral associé à une platyspondylie et à des hernies intraspongieuses. Cet aspect correspond à une anomalie de développement sagittal d'un corps vertébral. Pour Knuttsen, elle serait pathognomonique de la maladie de Scheuermann.

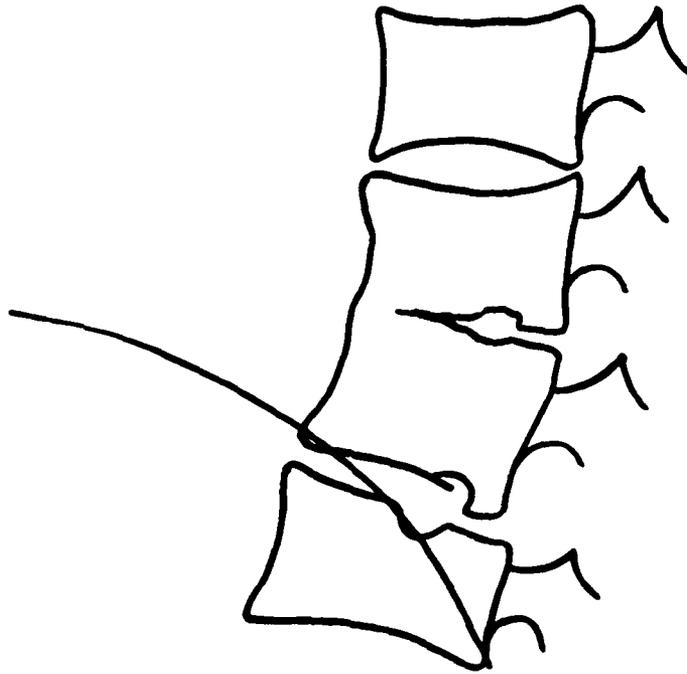


Figure 199 : Bloc D10-D11 séquellaire d'une maladie de Scheuermann.

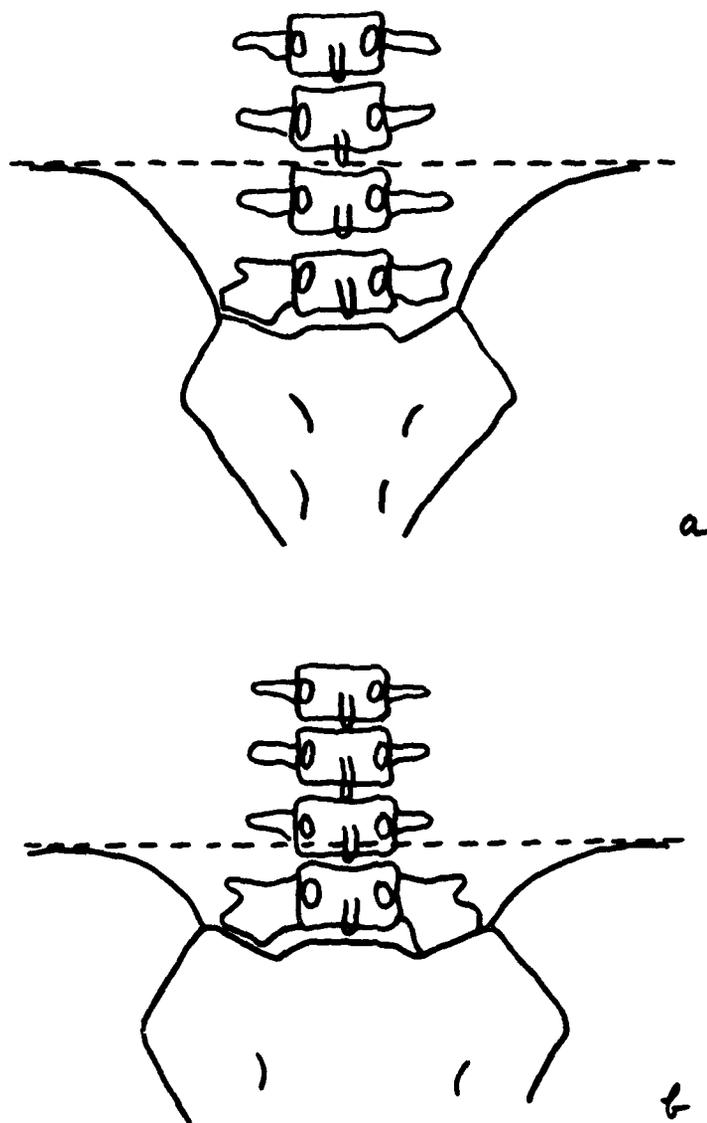


Figure 200 : a) Anomalie transitionnelle lombo-sacrée avec vertèbre ambiguë dont la transverse droite est hypertrophiée et néoarticulée, sans dégénéscement de la vertèbre charnière.

b) Dégénéscement marqué de la vertèbre charnière au-dessus de la ligne des crêtes iliaques.

Les altérations de l'interligne intervertébral

Il s'agit d'un pincement global ou partiel prédominant à sa partie antérieure, siégeant en regard des atteintes des plateaux vertébraux. Il est pratiquement constant dans la localisation dorsale de la maladie.

Les blocs vertébraux (76)(301)(319)(Fig 199)

Dans 5% des cas environ, cette lésion se constitue lentement vers l'âge de 15 ans. La fusion vertébrale s'établit entre 2 plateaux amenés au contact par un affaissement massif de la partie antérieure du disque. Le siège d'élection de ces blocs est dorsal inférieur (D9-D11) en rapport avec la prédominance des lésions de la maladie de Scheuermann à cette région. Le bloc présente les caractères radiologiques du bloc acquis. Sa présence modifie la répartition des forces d'inertie. Associé à d'autres lésions de la maladie, ce bloc constitue une cause d'inaptitude. Les localisations lombaires plus rares s'accompagnent assez souvent de rectitude de la colonne lombaire. Elles se caractérisent par la présence de volumineuses hernies rétro-marginales antérieures siégeant au niveau des plateaux supérieurs.

7.1.4.3. Les rapports des séquelles de l'épiphysose vertébrale de Scheuermann avec le traumatisme ont été très peu étudiés (319)

La présence d'une hypercyphose très fréquente dans les séquelles favorise l'apparition de fractures par le mécanisme de l'hyperflexion, lésions traumatiques apparaissant généralement à des niveaux très élevés (D2 à D5) et respectant les zones fréquemment atteintes par la maladie de Scheuermann (D7 à D10). Ces faits ont été observés chez des pilotes après éjection, ayant été admis dans le PN sans examen radiologique pratiqué à l'admission selon la réglementation alors en vigueur. Il faut reconnaître que l'importance et le retentissement de ces séquelles, lit de l'arthrose, sont difficiles à apprécier lors de la visite d'admission. Mais l'expérience nous démontre que les sujets porteurs de ces séquelles surtout lombaires, sont plus souvent atteints de lombalgies en pilotant les hélicoptères.

7.1.4.4. Classement des lésions séquellaires

Récemment, nous avons proposé un classement en degré faible, moyen et fort.

a) Degré faible : petites irrégularités des plateaux avec feuilletage et encoches de Schmorl sans modification de la morphologie générale des vertèbres.

b) Degré moyen : Déformation cunéiforme d'une vertèbre isolée ou associée aux autres signes, plus particulièrement avec des encoches localisées et des pincements discaux.

c) Degré fort : Déformation cunéiforme antérieure de plus d'une vertèbre associée à des irrégularités des plateaux, des encoches de Schmorl et à des feuilletages intéressants d'autres vertèbres avec important trouble de la statique sagittale (hypercyphose).

7.1.5. Les anomalies congénitales du rachis /

Fréquentes et variées, ces malformations créent des difficultés quotidiennes lors de l'interprétation radiologique des examens du rachis. Il faut surtout tenir compte de l'influence de ces anomalies sur la solidité du rachis et de leur évolution éventuelle au cours d'une vie professionnelle dont la durée peut atteindre 24-30 ans (52)(58)(60)(61)(62)(73)(76)(292)(307)(331)(416).

7.1.5.1. La déhiscence des apophyses épineuses

C'est une anomalie fréquente (près de 20% de la population) qui siège de façon préférentielle au niveau de L1 puis L5, plus rarement au niveau de C5 C7 C8 et D1. Cette anomalie apparaît sur le cliché de face sous la forme d'une clarté linéaire, le plus souvent médiane, plus ou moins large. Il est admis qu'elle ne diminue en rien la solidité du rachis et il faut la considérer comme une simple variante congénitale sans valeur pathologique. Il s'agit dans tous les cas d'une simple déhiscence de l'arc postérieur encore appelée improprement spina bifida occulta. Cette expression doit disparaître du langage médical car elle évoque la grave dystrophie méningo-médullaire qui constitue le spina bifida vrai associant déhiscence importante de l'arc postérieur et myélo-méningocèle.

7.1.5.2. Les anomalies transitionnelles de la charnière lombo-sacrée (61)(62)(292)

Relativement fréquentes (près de 10% de la population) elles sont dues à un défaut ou au contraire à une exagération du processus de différenciation du sacrum. Leur rôle favorisant l'apparition de lombalgies ou de lombo-sciatalgies est incriminé, certaines séries de malades atteints de hernies discales comprennent 30 à 50% d'anomalies transitionnelles de la charnière lombo-sacrée.

Essentiellement on en décrit deux variétés, la sacralisation de L5 et la lombalisation de S1. En fait, cette différenciation n'est pas toujours facile voire impossible s'il existe d'autres anomalies transitionnelles au niveau de D12 et de L1. De toute manière

la définition de la vertèbre ambiguë est dépourvue d'intérêt. Il suffit de rechercher le désencastrément de la néovertèbre charnière et la présence d'une ou de deux néoarticulations transverso-sacrées (Fig 200).

Rappelons que L5 est normalement encastrée entre les ailes iliaques. En cas de désencastrément, la vertèbre pivot occupe une position haute partiellement ou totalement au dessus de la ligne joignant les 2 crêtes iliaques. Elle n'est plus rattachée que de loin aux crêtes iliaques, par des ligaments longs et minces, peu puissants, obliques, incapables d'exercer sur sa mobilité le moindre freinage. A la jonction de cette pièce mobile et d'une pièce fixe, le disque charnière est soumis à un véritable surmenage fonctionnel favorisant l'apparition précoce des lésions de détérioration et d'usure (hernie discale, arthrose).

De manière à clarifier l'expertise, on appelle désencastrément marqué, la projection au dessus de la ligne bicrête du bord inférieur des apophyses transverses de la nouvelle vertèbre charnière.

Le désencastrément modéré projette le bord inférieur des transverses en dessous de la ligne bicrête.

Les néoarticulations sont le plus souvent transverso-sacrées. Elles sont rapidement le siège de phénomènes arthrosiques. Enfin ce type de malformation peut être asymétrique avec retentissement sur la statique sus jacente.

7.1.5.3. Spondylolyse et spondylolisthésis (62)(292)

La spondylolyse est une solution de continuité de l'arc vertébral postérieur passant au niveau de l'isthme inter-articulaire. Uni - bilatérale, elle intéresse dans la grande majorité des cas la cinquième vertèbre lombaire, plus rarement L4 et L3.

Isolée, elle ne détermine aucune manifestation clinique et se reconnaît facilement sur les radiographies de face, de profil et de 3/4 (figure 201) sous la forme d'un trait clair partageant l'isthme.

Le spondylolisthésis en est une complication caractérisée par le glissement en avant d'un corps vertébral (le plus souvent L5) sur la vertèbre sous jacente (le sacrum). Rencontrée dans près de 3% de la population le glissement se constitue en général avant la vingtième année (entre 8 et 15 ans). Des douleurs de différents types en sont la manifestation clinique habituelle. L'incidence radiologique de profil est la plus évocatrice (figure 202) mettant en évidence le glissement qui évolue en 3 stades, chacun correspondant au tiers de la vertèbre sous jacente.

Cette incidence permet également de constater l'arrondissement des canaux de conjugaison, les déformations éventuelles du corps de L5 et du sacrum, l'état du disque et les formations ostéophytiques secondaires. Il s'agit en effet d'une anomalie bouleversant la statique rachidienne habituelle d'une manière importante. Le glissement du corps de L5 entraîne un surmenage, une détérioration du disque L5 S1 et du plateau supérieur de S1 à l'occasion de faux mouvements d'efforts de soulèvement de poids, d'où une arthrose méniscosomatique et une déformation de la console sacrée (DEMOUVE et Coll) (282).

7.1.5.4. Les blocs congénitaux (52)(62)(292)(416)

Cette malformation fréquente résulte de la fusion partielle d'une ou de plusieurs vertèbres. Le bloc congénital doit être différencié d'un bloc acquis total ou partiel (antérieur ou postérieur) ce bloc se caractérise par la présence d'un reliquat discal, la conservation d'une hauteur normale des corps vertébraux, l'aspect rectiligne du contour postérieur et la diminution de hauteur des trous de conjugaison. C2 et C3 sont les vertèbres les plus souvent fusionnées (1,04% dans notre statistique de 2500 candidats au PN)

Les blocs congénitaux n'altèrent pas la solidité du rachis. Leur présence doit entraîner l'inaptitude s'ils s'accompagnent d'anomalies fonctionnelles ou statiques, ce qui ne se réalise généralement que si les blocs comprennent plus de 2 corps vertébraux. La pratique des clichés dynamiques trouve donc ici une indication. La localisation dorsale ou lombaire, la position du pilote (avions de combat, hélicoptère) doivent entrer en ligne de compte dans l'appréciation de l'aptitude. Ainsi l'existence d'un bloc lombaire L2 L3 par exemple, éventualité rare certes chez un candidat pilote d'hélicoptère, entraînera l'inaptitude. Par contre, cette même anomalie chez un pilote d'avion de combat ne justifierait peut-être pas l'inaptitude surtout s'il n'y a pas de retentissement fonctionnel et s'il n'existe pas d'autres lésions associées.

7.1.5.5. Les altérations dues à un trouble du développement du corps vertébral (416)

Plus rares, elles ne doivent pas entraîner d'inaptitude, lorsque la répercussion d'ensemble sur le rachis est modérée ou inexistante. Ainsi les coins antérieurs même multiples (2 ou 3) s'ils ne s'accompagnent pas de lésions sévères de Scheuermann ne doivent pas entraîner l'inaptitude. Par contre, le problème des hernies rétro marginales antérieures est plus préoccupant même quand elles sont isolées ou en nombre faible (1 ou 2). Il est certain que les

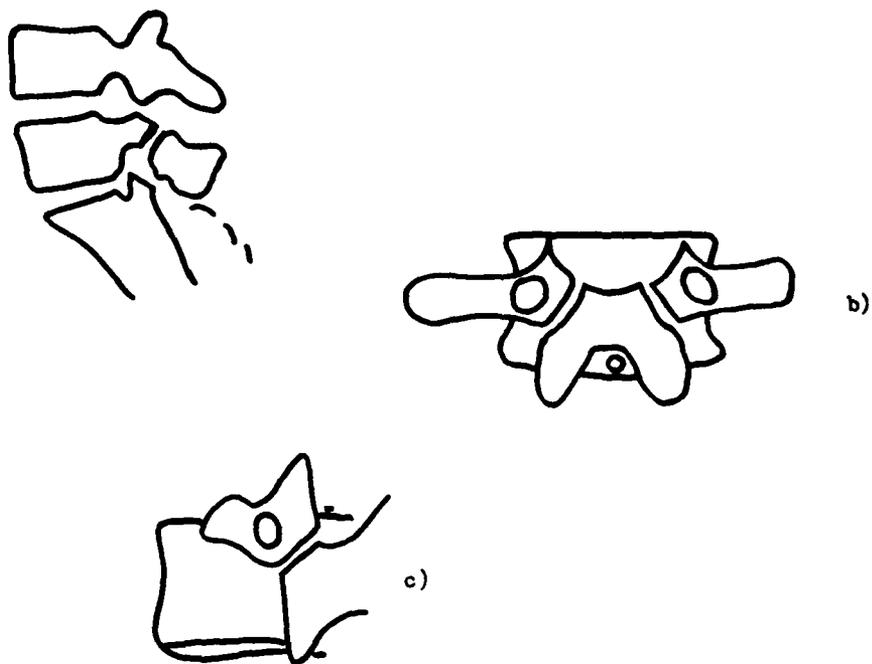


Figure 201 : Lyse isthmique
a) profil B) de face c) de 3/4

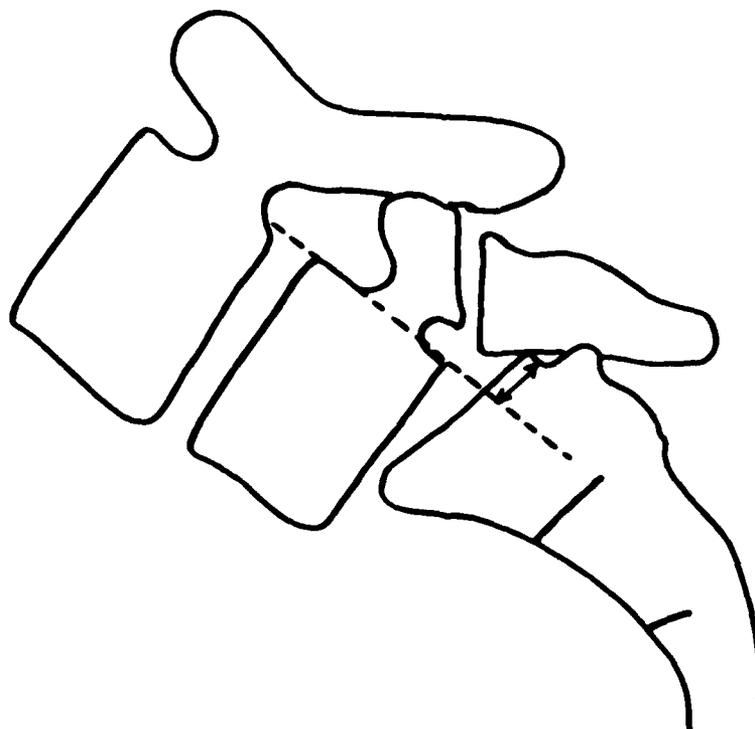


Figure 202 : Spondylolisthésis de L5 sur S1

localisations lombaires isolées doivent être analysées en tenant compte essentiellement de la future spécialité (pilote d'hélicoptère). Dans ce cas, la décision d'inaptitude pourra être retenue.

7.1.5.6. Les malformations congénitales complexes

Aisément analysées par les examens radiologiques complémentaires et en particulier les tomographies, ces malformations quelle que soit leur type, entraîneront l'inaptitude à tout emploi dans le PN, à savoir :

- les malformations de la charnière cervico-occipitale (impression basilaire en particulier)
- les agénésies et les hypogénésies vertébrales (hémicorps, hémivertèbre, somatoschisis).

7.1.6. Les affections acquises du rachis /

(9)(52)(70)(76).

Ce sont les affections évolutives de type tumoral, infectieux (spondylite, spondylodiscite), inflammatoire (spondylarthrite ankylosante). Reconnues elles entraînent un bilan complet et le plus souvent l'inaptitude définitive.

Les séquelles post-traumatiques (fractures le plus souvent) doivent être différemment considérées selon qu'il s'agit de séquelles de fractures stables (simple tassement cunéiforme antérieur) ou de séquelles de fractures instables avec atteinte du mur de résistance, rupture du mur postérieur, fracture de l'arc postérieur. L'état des disques adjacents doit également être pris en considération. Il apparaît nécessaire dans un souci de clarification de préciser les termes mineurs et majeurs dans les séquelles traumatiques.

Par séquelles traumatiques majeures, il faut considérer les séquelles de fracture instable, les séquelles de fracture cunéiforme antérieure avec rupture du mur postérieur, atteinte discale et retentissement sur la statique. Elles entraînent l'inaptitude complète à tous les postes.

L'appréciation du retentissement des séquelles minimales est laissée à l'appréciation de l'expert après examen clinique et radiologique. La plupart du temps, ces aspects séquellaires sont compatibles avec une fonction de pilote de chasse par exemple.

7.1.7. Les causes d'inaptitude déterminées par l'expertise clinique et radiologique

Les études cliniques et physiopathologiques permettent d'affirmer l'existence d'un segment rachidien critique propre à chaque poste de travail :

- rachis dorsal et charnière dorsolombaire lors de l'éjection d'un avion de combat
- rachis lombaire et charnière lombosacrée lors du pilotage des hélicoptères.

Puisque ces segments critiques sont différents, il apparaît difficile de concevoir un standard d'aptitude commun à ces deux postes de travail.

Il existe ainsi des causes communes d'inaptitude au pilotage d'avions de combat, d'hélicoptères et de transport et des causes d'inaptitude spécifiques aux deux premiers postes de travail (9)(52)(58)(60)(61)(76).

7.1.7.1. Les causes d'inaptitude communes à tous les emplois de pilotes.

Ce sont :

- les anomalies congénitales complexes,
- les affections évolutives,
- les troubles de la statique vertébrale dans le plan frontal (scoliose d'angle supérieur à 25°) et dans le plan sagittal (hypercyphose dorsale supérieure à 50°).

7.1.7.2. Les causes d'inaptitude spécifique au pilotage d'avion de combat

(9)(52)(60)(76).

- Les troubles de la statique dans le plan frontal quand l'angle scoliothique mesure plus de 15°. Dans le plan sagittal, l'appréciation de la cyphose tiendra compte de la présence ou non de séquelles d'épiphyse vertébrale (maladie de Scheuermann) pour les valeurs comprises entre 35 et 50°. Au delà de 50°, on prononce l'inaptitude.

- Les séquelles d'épiphyse siégeant au niveau de l'étage dorsal et correspondant au degré moyen défini précédemment. Les séquelles de degré faible et les localisations lombaires peu importantes sont compatibles avec l'emploi à ce poste de pilotage. Notons que les anomalies transitionnelles lombosacrées, les spondylolyses sans ou avec un spondylolisthésis inférieur à 1 cm sont compatibles avec le pilotage d'avion de combat.

7.1.7.3. Les causes d'inaptitude spécifique au pilotage des hélicoptères
(61)(76)

Ce sont :

- Les scoliozes quand l'angle dépasse 15°
- Les séquelles d'épiphysose entraînent l'inaptitude que si elles intéressent l'étage lombaire et si le degré d'atteinte est moyen.
- Certaines anomalies transitionnelles lombosacrées entraînent l'inaptitude :
 - . si le désencastrement est marqué, même quand la symétrie est respectée ;
 - . si le désencastrement est modéré avec asymétrie de l'anomalie de transition ;
 - . s'il existe une néo-articulation transverso-sacrée uni ou bilatérale quelque soit le type de l'anomalie.

En effet, l'aptitude ne sera prononcée que si le désencastrement est modéré, la symétrie conservée, s'il n'y a pas de néoarticulations.

- Le spondylolisthésis même si le glissement est inférieur à 1 cm est une cause d'inaptitude. Seule la spondylolyse sans spondylolisthésis permet l'emploi à ce poste de travail. Il faut insister sur le silence clinique et sur la nécessité d'une bonne musculature.

Les tableaux 7.3, 7.4., 7.5. résument les différentes précisions à prendre par l'expert de radiologie.

TABLEAU 7.3.

TROUBLES DE LA STATIQUE

(Décision à prendre)

		:Pilote : combat	: Pilote : Hélico	: Pilote : transport
Scolioses dorso-lombaires	: Angle inférieur ou égal à 15°	: Apte	: Apte	: Apte
	: Angle compris entre 15° et 25°	: Inapte	: Inapte	: Apte
	: Angle supérieur à 25°	: Inapte	: Inapte	: Inapte
Cyphose dorsale	: Prendre en considération les valeurs supérieures à 50° (tenir compte de la pré- sence ou non de séquelles d'épiphysose pour les va- leurs comprises entre 35° et 50°)	: : Inapte : :	: : Inapte : :	: : Inapte : :

TABLEAU 7 - 4
ANOMALIES CONGENITALES DU RACHIS
 (Décision à prendre)

		Pilote combat	Pilote hélico.	Pilote transport
Anomalies transitionnelles lombo-sacrées	Désencastrement marqué de la vertèbre pivot avec symétrie de l'anomalie de transition	Apte	Inapte	Apte
	Désencastrement modéré de la vertèbre pivot avec symétrie de l'anomalie de transition	Apte	Apte	Apte
	Désencastrement modéré de la vertèbre pivot avec asymétrie de l'anomalie de transition	Apte	Inapte	Apte
	Présence d'une néo-articu- lation transverso-sacrée unie ou bilatérale quelque soit le type de l'anomalie transitionnelle	Apte	Inapte	Apte
Lyse isthmique	Sans spondylolisthésis	Apte	Apte	Apte
	avec spondylolisthésis - glissement inférieur à lcm	Apte	Inapte	Apte
	- glissement supérieur à lcm	Inapte	Inapte	Inapte
Hoc congénital	Pas de trouble fonctionnel ou dynamique	Apte	Apte	Apte
	Trouble fonctionnel ou dy- namique	à apprécier par l'expert		

TABLEAU 7 - 5

DIVERS

		Pilote combat	Pilote hélico	Pilote transport
Séquelles d'épiphysose de la croissance (Maladie de Scheuermann)	Degré faible	Apte	Apte	Apte
	Degré moyen	dorsal : Inapte	Apte	Apte
		lombaire : Apte	Inapte	Apte
	Degré fort	Inapte	Inapte	Inapte
Hernie rétromarginale isolée, coin antérieur libre isolé		Apte	Apte	Apte
Anomalies congénitales majeures ou acquises		Inapte	Inapte	Inapte

7.1.8. Conclusion /

Nous proposons, en ce qui concerne l'aptitude rachidienne au pilotage, des standards adaptés aux segments rachidiens critiques propres aux différents postes de travail. Il s'agit surtout de pilotes d'avions de combat et des pilotes d'hélicoptères, l'aptitude à l'un de ces deux emplois ne signifie pas forcément l'aptitude à l'autre. En ce qui concerne le pilotage des avions de transport, la tendance en matière d'aptitude rachidienne nous paraît devoir être très large ; il n'existe pas de cause spécifique d'inaptitude du moment que le candidat est apte au service national. Dans ces conditions, il paraît logique de réserver lors de la visite d'admission un standard SGA A

- 1 - Apte
- 0 - Inapte

réservé au pilote d'avion de combat (siège éjectable)
et de créer un standard SGA H

- 1 - Apte
- 0 - Inapte

pour les pilotes d'hélicoptères.

Le fait d'être apte à une spécialité A ou H rend automatiquement apte au pilotage des avions de transport. Par ailleurs, il est possible d'être inapte pilote d'avion de combat et d'hélicoptère tout en étant apte pilote de transport.

De cette même façon, un candidat porteur d'un certain type d'anomalies transitionnelles de la charnière lombosacrée sera apte au pilotage d'avions de combat et inapte pilote d'hélicoptère. De toutes les aptitudes, l'aptitude au pilotage d'hélicoptère est la plus difficile.

Cette façon de concevoir l'aptitude d'un personnel navigant (pilote essentiellement) en fonction de sa spécialité, ne suscite pas beaucoup d'enthousiasme en France. Pourtant E. EVRARD General Major Medecin (CR des Forces Aériennes Belges) spécialiste mondialement connu de médecine aéronautique, dans le livre :

" Etude comparative des réglementations sur l'aptitude médicale aux emplois du PN dans 9 Aviations militaires de sept pays de l' OTAN (AGARD AG 213 de 1978 (82) ne déclare-t-il pas, page 17 :

" C'est en considérant les différentes fonctions navigantes avec leur pathologie propre et leurs exigences propres qu'il est possible de trouver en présence de certains défauts et de certaines anomalies des normes compatibles avec l'exécution des missions aériennes tout en respectant la sécurité du vol. D'autre part la traumatologie ostéoarticulaire prend une telle place en médecine aéronautique que les textes très détaillés semblent plus souhaitables que des textes trop concis qui se ramènent à quelques généralités sans commentaires explicatifs ".

Cette tentative d'individualisation des segments critiques tend à répondre à certains des impératifs fixés par E. EVRARD (82).

ANNEXE AU PARAGRAPHE 7 - 1

Dans cette annexe figurent, sous forme de tableaux, les résultats de 5000 examens radiologiques de l'ensemble de la colonne vertébrale se répartissant de la façon suivante :

- . 2500 chez des candidats au PN (statistique I élaborée de 1970 à 1975 inclus)
- . 2500 recrutés en milieu hospitalier (Hôpital BEGIN) (statistique II élaborée de 1971 à 1978).

TABLEAU 7 - 6

	Statistique I		Statistique II	
	P. N.		B E G ' I N	
	Nombre de cas	%	Nombre de cas	%
1. - Troubles de la statique dorso-lombaire dans le plan frontal	1867	74,68	1802	72,1
- Attitude scoliotique	518	20,72	485	19,4
- Scoliose sans déséquilibre pelvien	839	34,56	797	31,8
- Scoliose avec déséquilibre pelvien	510	20,40	520	20,8
2. - Troubles de la statique cervicale	471	18,84	425	17
- Inflexion	329	13,16	312	12,4
- Dysharmonie	95	3,80	87	3,5
- Dysharmonie + inflexion	47	1,88	25	1
3. - Séquelles d'épiphysose de SCHEUERMANN	302	12,08	335	13,4

TABLEAU 7 - 7

	P.N.		BEGIN	
	Nombre de cas	%	Nombre de cas	%
4. - Variations anatomiques				
Aspect cunéiforme antérieur	191	7,64	265	10,6
L1	102	4,08	110	4,4
L2	35	1,40	55	2,2
D12	30	1,20	35	1,4
Autres vertèbres	24	0,96	65	2,6
5. - Malformations congénitales				
a) Déhiscence de l'arc postérieur	482	19,82	537	21,4
S1	437	17,48	497	19,8
L5	23		20	
S2	12		14	
C5	2		1	
C6	1		1	
C7	1		1	
D1	0		1	
D12	5		1	
Divers			1	

TABLEAU 7 - 8

	P.N.		BEGIN	
	Nombre de cas	%	Nombre cas	%
5. - Malformations congénitales				
b) Anomalies transitionnelles	237	9,48	282	11,2
L5	109	4,36	142	5,7
Hémisacralisation	37	1,48	47	1,9
Sacralisation	72	2,88	95	3,8
S1				
Hémilombalisation	26	1,04	65	2,6
Lombalisation	102	4,08	75	3
c) Lyse isthmique	114	4,56	140	5,6
. avec spondylolisthésis	76	3,04	82	3,3
de L5 sur S1	68	2,72	77	3,1
de L4 sur L5	4		4	
de S1 sur S2	3		1	
de C6 sur C7	1		-	
. sans spondylolisthésis	38	1,52	58	2,3
L5	31		51	
L4	4		5	
S2	3		2	

TABLEAU 7 - 9

	P.N.		BEGIN	
	Nombre de cas	%	Nombre de cas	%
5. - Malformations congénitales				
d) Blocs congénitaux (en dehors des anomalies transitionnelles)	26	1,04	30	1,2
C2 - C3	10		19	
C3- C4	3		1	
C4 - C5	1		2	
C5 - C6	2		2	
C6 - C7	4		3	
C7 - D1	2		1	
D9 - D10	2		1	
D10 - D11	2		1	
e) Anomalies plus rares :				
. Coin antérieur	28	1,12	50	2
. Hernie rétro-marginale antérieure	46	1,84	35	1,4
. Ebauche de côte cervicale	9	0,36	12	0,4

7.2. VISITES REVISIONNELLES

Toute lésion peut fragiliser le rachis et le sensibiliser à l'action des différents facteurs d'agression du vol. Certains sont habituels et inhérents au vol (vibrations, accélérations de longue durée), d'autres accidentels comme l'éjection surtout, ou le crash plus rare, soumettent le squelette du pilote à des forces considérables appliquées pendant une très courte durée. De plus, les accidents de la circulation, de pratique sportive, entraînent parfois dans leurs suites immédiates ou lointaines, des troubles d'une gravité variable mais pouvant retentir sur la capacité opérationnelle des pilotes.

La conduite à tenir, dans ces visites révisionnelles s'échelonnant le long de la carrière du personnel navigant, est très différente de celle de l'admission. Il n'existe pas de ligne de conduite précise et stéréotypée (9). Chaque malade, chaque blessé est un cas particulier et toujours les décisions ne peuvent être que le fruit d'une confrontation médico-chirurgicale.

7.2.1. Les fractures et les traumatismes du rachis

Extrêmement fréquentes apparaissent après des traumatismes variés : accidents de la route, sports, pratique aéronautique. Quelle que soit leur étiologie, les problèmes d'aptitude posés par leur existence sont toujours très difficiles.

7.2.1.1. Les fractures du rachis dorso-lombaire

Les fractures du rachis dorso-lombaire s'observent dans la pratique aéronautique (éjection, crash, surtout parachutisme). Elles modifient très souvent la solidité de la colonne vertébrale et les décisions d'aptitude dépendent du type de la fracture.

Deux types de fractures sont à distinguer :

- les fractures comminutives,
- les simples tassements.

1. Fracture comminutive des vertèbres dorso-lombaires :

Watson-Jones (448) a insisté sur un certain nombre de faits fondamentaux. Lorsque le rebord antérieur d'un corps vertébral pénètre au sein d'un corps fracturé, le rachis au moment du traumatisme était en hyperflexion. Les ligaments interépineux sont arrachés et souvent les articulations interapophysaires ont été luxées. Les disques vertébraux sus jacent au foyer de fracture et sous jacent sont atteints. Ces fractures sont du type instable.

R. Watson-Jones (448) considère qu'un traumatisme provoquant une dislocation isolée, un tassement d'un ou de plusieurs corps vertébraux, une rupture discale, un arrachement ligamentaire, une fracture des pédicules, une luxation interarticulaire, une destruction partielle des trous de conjugaison ou une compression des racines nerveuses entrainera vraisemblablement la persistance d'un important syndrome douloureux, même si le déplacement est réduit et la réduction maintenue. Ces fractures sont lentes à consolider si l'on recourt au traitement conservateur, l'immobilisation plâtrée doit être poursuivie au moins 5 mois, parfois 6-7 mois. La synostose des corps vertébraux et l'ossification autour des apophyses articulaires n'apparaissent que tardivement. Les phénomènes douloureux, la gêne et la sensation de faiblesse durent très longtemps. La guérison fonctionnelle après fracture comminutive grave ne s'observe qu'au bout de plusieurs années.

Les chirurgiens essaient d'accélérer cette guérison par une intervention favorisant la fusion des apophyses épineuses et des lames vertébrales.

La décision, pour le médecin chargé d'examiner ce pilote, est simple. Les blessés atteints de fractures comminutives doivent être classés inaptes pilotes d'avions de combat, inaptes pilote d'hélicoptère, inaptes parachutisme selon leur spécialité. La colonne vertébrale n'est plus capable de supporter sans risques de décompensation les nuisances constantes du vol et à fortiori les traumatismes accidents de l'aéronautique (nouvelle éjection, crash). De plus, ces sujets souffrent fréquemment dans les conditions de vie habituelle car l'arthrose survient avec une fréquence importante et variable selon les statistiques (60 à 70%). Les fractures luxations doivent entrainer l'inaptitude définitive à tout emploi de pilote.

Il faut néanmoins signaler l'existence de plusieurs exceptions à ces règles sévères car il est nécessaire de tenir compte du profil psychologique du pilote, de son expérience (pilote d'essai par exemple). Nous suivons plusieurs pilotes pour lesquels la décision d'inaptitude définitive au P.N. n'a pas été prise. Il s'agit de 2 cas de fractures comminutives de D6 (éjection) et 1 cas de D5 (accident d'automobile) L'évolution spontanée vers l'ankylose, l'apparition rapide d'arthrose, le préjudice

de carrière ont incité les experts à prononcer une aptitude très restreinte. Ces trois pilotes de chasse ont été déclassés (pilote de transport ou pilote d'avions légers). Ces exceptions ont nécessité de nombreuses confrontations entre médecins et chirurgiens. Les aptitudes ont toujours été limitées dans le temps et les visites médicales, les contrôles radiographiques, ont démantré dans ces cas très particuliers, le bien fondé de ces décisions chez des pilotes qui occupaient essentiellement des postes d'état-major et qui de ce fait avaient des activités aéronautiques très réduites.

2. Fractures simples par tassement

La guérison rapidement obtenue est toujours facilitée par l'emploi d'une gymnastique adaptée au cas clinique. La reprise des vols des pilotes peut être rapidement autorisée grâce à l'aide efficace des flight surgeons. Ces derniers surveillent attentivement la reprise d'une activité professionnelle souvent intense (cas des pilotes d'escadre de chasse). Pour les pilotes d'hélicoptère, la conduite suivie n'est pas toujours simple et habituellement les reprises d'activité sont souvent plus tardives. Du fait de l'importance des vibrations, nous pensons qu'il est souhaitable de surveiller attentivement l'évolution de l'état des sujets après reprise des vols et de dépister la survenue d'un syndrome douloureux. Une gymnastique vertébrale quotidienne douce, n'aggravant pas les douleurs rachidiennes, un endoctrinement du personnel navigant qui doit participer aux traitements et non les subir, un soutien psychologique, facilitent toujours l'activité opérationnelle de ces pilotes.

Les Médecins d'escadre jouent là un rôle essentiel fondamental et irremplaçable. Ils sont maintenant conscients de la bénignité de ces fractures simples par tassement, ce qui ne s'observait pas il y a 25 ans ! Des décisions trop sévères et immédiates ne s'imposent plus du fait d'une meilleure connaissance de l'évolution de ces lésions.

7.2.1.2. Fractures du rachis cervical

Elles sont dues le plus souvent à des accidents de la route, ou à la pratique sportive mais surviennent plus rarement, au cours d'activités aéronautiques (parachutisme, crash, accidents d'atterrissage de pilotes éjectés). Il s'agit le plus souvent de fractures luxations siégeant surtout entre C5 et C7.

D'une façon générale, l'expert a tendance à éliminer ces blessés et à les classer inapte définitif à tout emploi du PN après un bilan clinique et radiologique

Dans les fractures isolées des masses latérales de l'atlas n'entraînant pas de modifications profondes de la statique et ne créant pas de retentissement clinique, des décisions d'aptitude restreinte - pilotage d'avions légers ont été proposées à quatre reprises.

Tous les cas de fracture-luxation de l'atlas-axis même traitées chirurgicalement ne nous ont pas paru permettre la poursuite d'une carrière aéronautique, même avec une aptitude limitée.

Les fractures isolées des articulaires, parfois méconnues sur les examens radiologiques précoces, doivent après un bilan clinique et radiologique (examen dynamique, en particulier) et une rééducation correctement menée, faire l'objet de décisions moins sévères.

7.2.1.3. Les fractures des apophyses transverses

des vertèbres lombaires, souvent multiples doivent après traitement et rééducation des masses musculaires, permettre la poursuite d'une activité aéronautique normale. Il est certain que pour les pilotes d'hélicoptères l'inaptitude temporaire est souvent plus longue que pour les pilotes de chasse. De plus, la reprise des vols sur hélicoptère sera particulièrement surveillée par le médecin d'escadre.

7.2.1.4. Les traumatismes du rachis sans fracture.

L'absence de lésions radiologiques ne signifie pas l'absence de lésions anatomiques sur les disques intervertébraux et sur les ligaments péri-vertébraux. L'apparition d'algies, d'une détérioration discale dans les années suivant l'éjection ou le traumatisme est toujours possible. Il est souvent très difficile chez ces pilotes de prouver que de l'atteinte traumatique découle la survenue de douleurs d'arthrose. Les contrôles radiologiques échelonnés: 6 mois, 12 et 18 mois après le traumatisme, suffisent parfois pour déceler l'évolution rapide d'une arthrose.

7.2.2. Ostéoarthrites vertébrales (9)(70)(76)

7.2.2.1. La présence d'une ostéoarthrite tuberculeuse du rachis (Mal de Pott) est pour nous facile à évoquer. Dans l'Armée Française (Armée de l'air, aéronavale, Aviation légère de l'Armée de Terre) cette affection est éliminatoire à l'admission. Depuis la pratique obligatoire des examens radiographiques de la colonne vertébrale à la visite d'admission il n'a pas été observé de Mal de Pott.

La décision d'invalidité définitive chez un personnel navigant en activité ne sera prise, non pour des raisons de mécanique, mais pour la présence de l'infection tuberculeuse toujours susceptible de se réveiller malgré la pratique de traitements médicaux efficaces.

L'observation de plusieurs cas d'ostéoartrites tuberculeuses en pratique courante, chez des civils ou des militaires n'appartenant pas au P.N. nous autorise à formuler une opinion très tranchée. Il ne peut être question, même après un traitement médical non mutilant ou chirurgical limité, d'autoriser la poursuite d'une activité aéronautique opérationnelle (avions de chasse, avions de transport, hélicoptère) ou parachutiste. Nous considérons que seule la décision logique est l'invalidité définitive quelque que soit l'ancienneté, l'expérience, la valeur du pilote ou du personnel navigant.

7.2.2.2. Les autres ostéoartrites (9)(70)(76)

(méritococciques, staphylococciques) méritent une attention toute particulière, les unes comme les autres détruisent peu les corps vertébraux et ont tendance à créer très rapidement une ankylose. Nous manquons d'expérience en ce qui concerne la pratique aéronautique. Mais, nous avons pu constater qu'une fois, l'affection consolidée, il n'apparaît pas de fragilité particulière ; ces opinions, bien entendu, reposeront toujours sur un bilan clinique, biologique et radiologique complet. Dans certains cas, nous estimons que l'invalidité restreinte peut être formulée en tenant compte du siège de l'atteinte, de l'importance des lésions observées et de la spécialisation (pilote avion de combat, avion léger, hélicoptère).

7.2.3. Arthrose Vertébrale

Sommaire particulier

- | |
|---|
| 7.2.3.1. Généralités |
| 7.2.3.2. Pathogénie de l'arthrose du rachis |
| 7.2.3.3. Arthrose cervicale |
| 7.2.3.4. Arthrose dorsale |
| 7.2.3.5. Arthrose lombaire |
| 1. Discarthrose |
| 2. Arthrose interapophysaire |
| 7.2.3.6. Aspects médico-aéronautiques de l'arthrose |
| 1. Généralités |
| 2. Fréquence de l'arthrose vertébrale dans le P.N. |
| 3. Responsabilité du vol dans le développement de l'arthrose. |
| 7.2.3.7. Décisions d'aptitude |
| 1. Admission dans le P.N. |
| 2. Visite révisionnelle |
| 7.2.3.8. Aptitude et thérapeutique |
| Conclusions |

7.2.3. Arthrose vertébrale /

7.2.3.1. Généralités :

L'arthrose se définit comme une altération primitive, destructive et dégénérative du cartilage articulaire avec l'apparition secondaire d'altérations osseuses sous jacentes et accessoirement d'une réaction inflammatoire synoviale. Parmi les localisations de l'arthrose, une place très importante doit être donnée aux articulations intervertébrales.

Il existe deux localisations du processus arthrosique au niveau du rachis :

- la discarthrose caractérisée par une détérioration discale dégénérative accompagnée ou non d'ostéophytose antérieure et latérale ;

- L'arthrose interapophysaire surtout fréquente à l'étage lombo-sacré lorsque les surfaces articulaires se rapprochent de l'horizontale. Elle se rencontre également à la colonne cervicale. Elle est caractérisée par une atteinte du cartilage avec érosions, ulcérations, et ostéophytose avec parfois déformation de l'apophyse articulaire inférieure responsable du spondylolisthésis acquis arthrosique. Il existe souvent à ce niveau une atteinte inflammatoire réactionnelle de la synoviale articulaire.

7.2.3.2. Pathogénie de l'arthrose du rachis

L'arthrose vertébrale augmente de fréquence avec l'âge. Schmorl (416) dans une étude anatomique systématique, montre que 93% des hommes et 84% de femmes de 50 à 60 ans présentent des signes de détérioration discale mais il existe de très grandes variations d'un cas à l'autre. Comme pour les arthroses des membres, la qualité du cartilage et du fibrocartilage diffère selon les individus. Cette variabilité étant vraisemblablement liée à des facteurs génétiques.

Les facteurs mécaniques jouent un rôle certain dans la détérioration discale comme dans celle du cartilage des articulations interapophysaires.

DE SEZE (455) insiste notamment sur le rôle du surmenage mécanique dans la détérioration du disque sus jacent aux anomalies transitionnelles lombo-sacrées et sur la prédominance de la détérioration discale dans la concavité de la courbure vertébrale dans les arthroses, là où dominent les pressions. L'arthrose interapophysaire lombo-sacrée s'observe fréquemment chez les sujets ayant une importante hyperlordose qui oriente les articulations interapophysaires dans un plan horizontal où elles tendent à supporter le poids du corps. Il n'existe aucune proportionnalité entre les lésions anatomiques de discarthrose ou d'arthrose interapophysaire et les manifestations cliniques.

La discarthrose avec ostéophytose même importante est très souvent totalement asymptomatique. L'ostéophytose rachidienne représente plus la cicatrice d'un processus ancien qu'une affection actuelle.

Les douleurs de la détérioration discale sont essentiellement liées aux migrations du nucléus dans l'anneau fibreux détérioré et fissuré avec hernies intra discales atteignant les régions périphériques du disque qui sont innervées et donc potentiellement douloureuses (De Sèze) (455).

7.2.3.3. Arthrose cervicale

Les manifestations douloureuses de la colonne cervicale, surviennent généralement entre 40 et 60 ans. Il s'agit soit de cervicalgies soit d'une radiculalgie cervico-brachiale.

1°) Les cervicalgies apparaissent soit spontanément soit à l'occasion d'un mouvement du cou ou d'une attitude du cou maintenue de façon prolongée. Cette douleur soit permanente, soit intermittente, est augmentée par les mouvements du cou. Souvent plus vive la nuit, elle apparaît plus particulièrement le matin surtout lorsque le rachis cervical est resté en porte à faux, dans une attitude de flexion latérale mal soutenue par un traversin et ou un oreiller trop volumineux.

- L'examen clinique est très pauvre. On observe parfois une hyperlordose cervicale une limitation des mouvements de flexion-extension, flexion latérale et rotation du cou. La palpation met parfois en évidence des points douloureux dans les régions latéro-cervicales antérieures.

- L'examen radiologique montre habituellement à l'étage C5-C6 des anomalies des disques avec affaissement discal, ostéophytose antérieure, condensation des plateaux vertébraux, déformation et condensation des apophyses unciformes avec ostéophytose bien visible sur les clichés de 3/4, déformant les trous de conjugaison. Cette uncodiscarthrose s'observe également à l'étage C6.C7. Les autres étages vertébraux sont plus rarement atteints et s'il y a une atteinte isolée en cause, notamment traumatique, doit être systématiquement recherchée dans les antécédents du patient.

Les interlignes interapophysaires sont habituellement normaux. Aux étages cervicaux supérieurs s'observent pincement, condensation, ostéophytose des apophyses articulaires qui compriment parfois les racines cervicales dans le trou de conjugaison. Cliniquement, l'arthrose interapophysaire provoque des cervicalgies hautes avec irradiations occipitales et vertiges avec limitation des mouvements du cou.

2°) La radiculalgie cervico-brachiale parfois inaugurale et révélatrice de la cervicarthrose survient le plus souvent comme complication de celle-ci. Assez souvent déclenchée par un traumatisme, elle survient dans les jours ou les semaines suivant le traumatisme. Une douleur très vive, brutale ou progressive, aggravée par le décubitus, réveille le malade la nuit. Grâce à la topographie de la douleur on affirme l'origine de la compression C5 : face externe de l'épaule et du bras ; C6 : face externe de l'épaule, du bras, de l'avant-bras jusqu'au pouce parfois l'index ; C7 : épaule, bras, avant-bras, médus, annulaire parfois aussi l'index ; C8 : partie interne de l'épaule, du bras, de l'avant-bras, auriculaire et annulaire.

La distribution radiculaire des phénomènes douloureux est le plus souvent imprécise. Il existe des irradiations scapulaires ou thoraciques antérieure qui posent parfois des

problèmes difficiles de diagnostic. Les douleurs s'accompagnent de troubles sensitifs à type de paresthésies. Il n'y a généralement pas de déficit moteur. Les réflexes ostéotendineux peuvent être diminués légèrement dans le territoire atteint. Il existe parfois une hypoesthésie à topographie radiculaire. L'atteinte médullaire est une complication très rare de la cervicarthrose.

Le traitement consiste à immobiliser le cou avec un collier cervical et à administrer un anti-inflammatoire non stéroïdien durant toute la période douloureuse. Il est exceptionnel de recourir à la corticothérapie intrathécale. La chirurgie a des indications relativement rares.

7.2.3.4. L'arthrose dorsale ou dorsarthrose, comme la cervicarthrose et la lombarthrose est très fréquente. Elle est souvent associée avec l'arthrose lombaire. Cette variété d'arthrose est fréquemment muette cliniquement.

On observe parfois une hypercyphose dorsale régulière, relativement peu importante.

Radiologiquement, les interlignes sont pincés surtout dans leur partie antérieure avec une ostéophytose antérieure et latérale siégeant surtout à droite du rachis. Les plateaux vertébraux sont fréquemment irréguliers et condensés. Cette arthrose dorsale complique fréquemment les séquelles de la maladie de Scheuermann (dystrophie rachidienne de croissance).

7.2.3.5. L'arthrose lombaire ou lombarthrose, souvent latente, est extrêmement fréquente entre 30 et 60 ans.

Cliniquement, ces manifestations fonctionnelles douloureuses sont fréquemment déclenchées par un traumatisme.

1°) La discarthrose

Cliniquement, la discarthrose se manifeste par des douleurs surtout fréquentes, soit aiguës (lumbago), soit chroniques.

Le lumbago est une douleur soit spontanée soit provoquée par un faux mouvement, un effort de soulèvement ou un traumatisme. Débutant brusquement, la douleur généralement lombaire basse, extrêmement vive, n'irradie pas. Il existe une impression de " blocage" du rachis lombaire. Cette douleur exacerbée par les mouvements, les efforts de toux, est calmée par le repos en décubitus.

Les douleurs et la gêne fonctionnelle disparaissent en quelques jours, mais le lumbago récidive fréquemment. Les crises ultérieures, parfois d'évolution plus longue, aboutissent finalement à la lombalgie chronique.

La lombalgie chronique succède à une ou plusieurs crises de lombalgies aiguës ou apparaît d'emblée. La douleur siège dans la région lombaire basse. Augmentée par les efforts de soulèvement, la station debout, la station assise, la marche prolongée, les voyages en voiture, elle disparaît par le repos en décubitus. Elle irradie parfois dans les régions fessières. En dehors d'une douleur à la palpation des épineuses, des espaces inter-épineux ou des régions para-vertébrales au niveau de L4 et de L5, l'examen clinique est normal. Il existe parfois une limitation modérée des mouvements du rachis en flexion en avant, en flexion latérale et en extension. Radiologiquement le rachis peut être normal. Assez souvent, il existe un ou plus rarement plusieurs pincements des interlignes avec une ostéophytose antérieure plus ou moins importante s'accompagnant parfois de condensation le plus souvent latérale au niveau de L4.L5 ou de L5 S1. Des anomalies vertébrales, des anomalies transitionnelles lombo-sacrées uni ou bilatérale, une spondylolyse, avec ou sans spondylolisthésis, des séquelles de dystrophie rachidienne de croissance sont parfois marquée par la survenue de radiculalgies sciatiques de topographie L5 ou S1, plus rarement de cruralgies.

2°) L'arthrose inter-apophysaire s'observe surtout après 50 ans. Siégeant soit en L4.L5, L5.S1 plus rarement en L3.L4, elle est souvent secondaire à une hyperlordose lombaire.

- Cliniquement : elle se révèle soit par des douleurs lombaires basses assez caractéristiques : douleur particulièrement vive en position assise prolongée, à la marche prolongée, au port de charges. Elle réveille le malade la nuit, mais dans ce cas, les changements de position la calment momentanément. Parfois s'individualise le tableau de la sténose du canal rachidien lombaire avec syndrome de claudication intermittente radiculaire : la douleur de topographie sciatique ou crurale, uni ou bilatérale ne dépassant souvent pas le genou, apparaît à la marche après une certaine distance (quelques centaines de mètres), pour disparaître à l'arrêt ou lorsque le malade se penche en avant. La douleur réapparaît après la reprise de la marche. Cette douleur s'accompagne souvent de paresthésies. A l'examen on met en évidence parfois des points douloureux à la pression des régions des apophyses articulaires dans les régions para-vertébrales. Il n'y a pas de signe de Lasègue. La flexion en avant et latéralement n'est pas douloureuse tandis que l'extension déclenche des douleurs vives.

- Radiologiquement : De face, il existe une condensation avec hypertrophie des massifs articulaires. Le profil et surtout les incidences de 3/4 précisent la condensation,

l'hypertrophie, et les déformations des apophyses articulaires avec pincement des interlignes. Il existe assez souvent une spondylolisthésis arthrosique de L4 sur L5 plus rarement de L5 sur S1. Dans les cas fréquents de discarthrose associée, on observe un ou plusieurs rétrolisthésis. Les tomographies révèlent l'existence d'une sténose du canal rachidien lombaire. La tomodensitométrie étudie parfaitement cette sténose du canal rachidien au niveau des articulations interapophysaires.

Le traitement de l'arthrose lombaire fait appel au ménagement physique, voire au repos lors des poussées, aux antalgiques, aux anti-inflammatoires, à la rééducation gymnique pluriquotidienne en lordose corrigée, à la lutte contre la surcharge pondérale éventuelle. Dans la sténose du canal rachidien lombaire avec symptomatologie douloureuse rebelle aux traitements, la laminectomie peut être nécessaire et entraînera ipso facto l'inaptitude P.N.

7.2.3.6. Aspects médico-aéronautiques de l'arthrose

1. Généralités :

Il existe très peu de travaux consacrés à l'arthrose vertébrale dans le Personnel Navigant (P.N.)

A notre connaissance, les seuls documents d'ensemble consacrés au rachis qui y font référence, sont :

- 1° Agardograph N° 140, publié par R.P. DELAHAYE et Coll (52)
- et le rapport Consultatif de l' A.G.A.R.D. N° 72 publié par R. AUFFRET et R.P. DELAHAYE (9).

L'arthrose est pourtant l'affection vertébrale qui pose le plus de problèmes médico-aéronautiques, si on excepte les fractures du rachis. Ceci tient à plusieurs causes :

1. Sa fréquence est élevée dans nos contrées ;
2. Elle semble, dans certains cas, contracter des liens étroits avec le travail aéronautique, posant des problèmes d'imputabilité et d'indemnisation
3. Elle peut, de ce fait, dans certaines spécialités, mettre en jeu l'aptitude à l'emploi dans le P.N.

2. Fréquence de l'arthrose vertébrale dans le P.N.

L'arthrose vertébrale est relativement fréquente à partir de l'âge de 40 ans, tout au moins dans son expression radiologique asymptomatique. Elle peut s'observer de façon non exceptionnelle à des âges nettement inférieurs, allant jusqu'à 30 ans et même moins.

Il est difficile de savoir, dans ces conditions, si sa fréquence est plus grande dans la population sélectionnée que représente le P.N. Quelques Auteurs ont cependant essayé de répondre à cette question. Leurs études concernaient essentiellement :

- le rachis lombaire des pilotes d'hélicoptères (voir chapitre 6-1)
- le rachis cervical des pilotes de chasse (voir chapitre 6-2)

Les études effectuées jusque là ont porté sur un faible échantillonnage et restent limitées dans le temps. Il est actuellement impossible de porter une conclusion définitive, du fait également du changement important des caractéristiques du travail aérien (hélicoptère) et des améliorations dans la technologie (niveau vibratoire moins élevé sur les nouveaux hélicoptères).

3. Responsabilité du vol dans le développement de l'arthrose

Le travail aérien peut-il être directement responsable de l'arthrose vertébrale, ou'il s'agisse de son installation ou de son aggravation ? et peut-on, à la limite, parler de pathologie professionnelle dans certains cas ? peut-on envisager l'imputabilité au service aérien des lésions observées, et leur indemnisation ?

Il est connu que les microtraumatismes répétés peuvent être responsables du développement de l'arthrose, et ceci est vrai également au niveau vertébral.

En aéronautique, trois facteurs peuvent intervenir dans ce sens :

- les vibrations,
- les accélérations,
- le facteur postural (mauvaise position du pilote)

Nous ne reviendrons pas sur ces facteurs nocifs déjà analysés précédemment (ch chapitre 4).

En pratique, il faut distinguer :

- le pilote d'hélicoptère, surtout exposé aux vibrations et au facteur postural,

- le pilote de chasse, surtout exposé aux accélérations.

Le pilote d'hélicoptère :

Il semble surtout exposé à l'arthrose lombaire.

Sur le plan clinique, les douleurs rachidiennes sont pratiquement toujours des lombalgies, aiguës ou chroniques, accompagnées ou non de sciatalgies.

Selon DELAHAYE et Coll (75) les lésions radiologiques arthrosiques sont fréquentes chez les pilotes d'hélicoptère lombalgiques. Elles atteignent surtout la région lombaire (L2 à L5). Elles réalisent le plus souvent un pincement des interlignes avec ostéophytose marginale antérieure.

Il reste cependant difficile d'établir la responsabilité directe du vol dans le développement de l'arthrose lombaire chez le pilote d'hélicoptère et ceci pour deux raisons au moins :

- Il existe de grandes variabilités individuelles vis à vis du développement de l'arthrose et il n'a pas encore été mené, à notre connaissance, de grandes études longitudinales comparatives entre pilotes d'hélicoptères et population de référence.

- Il est difficile d'établir un rapport entre les lombalgies et les lésions radiologiques observées. Nous avons pu constater, en effet, après bien d'autres, que les pilotes en situation d'expertise dissimulent leurs lombalgies par crainte de perdre leur aptitude. Au contraire, lors des pertes de motivation pour des raisons diverses, en particulier d'ordre psychologique, il y a souvent une majoration des lombalgies.

Le pilote de combat

Le facteur de nuisance est ici réalisé avant tout par les accélérations

+ Gz. C'est la colonne cervicale qui, classiquement, est la plus exposée. Elle doit, en effet, au cours des accélérations, supporter la masse de la tête, et du casque parfois lourd. Dans le même temps, les manoeuvres qui visent à combattre les effets cardio-vasculaires des accélérations la désolidarisent du plan fixe (siège) où elle pourrait prendre appui.

Comme d'autres auteurs, nous avons pu recueillir plusieurs observations de cervicalgies déclenchées par les accélérations au cours d'exercices de voltige. Dans ces cas, où la radiographie a montré des lésions patentes d'arthrose, les accélérations ont été, au minimum, à l'origine de l'épisode douloureux révélateur.

La responsabilité des accélérations doit être particulièrement discutée lorsque les lésions d'arthrose sont découvertes chez un sujet jeune (30^{ans} ou moins) et lorsqu'elles ont un siège inhabituellement haut (C2.C3, C3.C4, C4.C5) (52).

La discarthrose, maladie d'avenir du pilote de combat ?

Les nouvelles générations d'avion de combat (F.16, MIRAGE 2000 par exemple) vont exposer les pilotes à des accélérations répétées et de longue durée. On peut déjà se demander si les disques intervertébraux ne vont pas souffrir au cours de telles accélérations, et si à côté des problèmes cardio-vasculaires et pulmonaires ne vont pas se poser des problèmes vertébraux, en particulier vis à vis de la discarthrose ?

Par ailleurs, pour obtenir une plus grande maniabilité, les techniques ont mis au point des appareils dits instables, maintenus par un système de commande de vol électronique. La faillite de ce système de cerveau - réglage expose le pilote à une série successive de fortes accélérations, alternativement positives et négatives, pouvant dépasser 9 Gz. Au cours d'une telle situation, dite "accident de pompage" le pilote qui échappe à un accident fatal ne peut absolument pas contrôler son corps. Il est littéralement ballotté comme un pantin, et sa colonne particulièrement traumatisée.

7.2.3.7. Décision d'aptitude

1. Admission dans le personnel navigant

A l'âge de l'admission dans le P.N., l'arthrose ne pose pratiquement pas de problème parce qu'inexistante. Le seul souci de l'expert est de dépister les anomalies de structure ou de la statique vertébrale qui peuvent favoriser son apparition.

2. Visites révisionnelles

En cours de carrière, les anomalies radiologiques isolées, sans manifestations douloureuses, ne posent pas de problème d'aptitude en principe. Il faut rappeler encore ici qu'il n'existe pas de corrélation entre l'importance des signes radiologiques et la gêne fonctionnelle. Le problème de l'aptitude se pose différemment selon les spécialités aéronautiques et la thérapeutique.

- Chez le pilote de transport, les manifestations cliniques de l'arthrose, en rapport le plus souvent avec la surcharge pondérale, la sédentarité, n'entraînent au pire qu'une inaptitude temporaire, qui permet de mettre en jeu une thérapeutique appropriée en cas de douleurs.

- Chez le pilote d'hélicoptère, si aux lésions radiologiques patentes d'arthrose s'associent des poussées douloureuses importantes, répétées, une décision d'inaptitude définitive doit être raisonnablement discutée. Ceci d'autant que l'intéressé pourra éventuellement demander réparation par la suite.

Il faut bien entendu, dans ces cas, tenir compte de l'âge, des aspects radiologiques des mesures thérapeutiques déjà mises en jeu, et du respect des charges de travail.

Actuellement, il est généralement admis que les lombalgies apparaissent en moyenne pour des temps de vol de :

30 à 40 heures par mois,
3 à 4 heures par jour,
1 H 30 de vol de suite.

Il existe de grandes variations individuelles selon les sujets et leur motivation. Mais ces chiffres ne devraient pas être dépassés lorsqu'existent des lésions radiologiques d'arthrose.

- Chez le pilote de chasse, c'est en général la tolérance aux accélérations qui règle les problèmes d'aptitude. Le test en centrifugeuse peut, à cet égard, être utile pour juger de l'efficacité d'une thérapeutique, et la possibilité d'une reprise des vols après l'arrêt temporaire nécessaire à la mise en oeuvre d'un traitement.

Comme dans le cas précédent, la décision d'aptitude ou d'inaptitude sera fonction de plusieurs facteurs (âge, importance de la gêne fonctionnelle, aspect des lésions radiologiques). On sera là particulièrement attentif aux signes de discarthrose, lésion que l'on sait plus sensible aux accélérations, alors qu'une ostéophytose importante pourra s'accompagner d'une excellente tolérance aux mêmes accélérations.

Lorsqu'un pilote de chasse présente des signes de discarthrose, importants (pincement marqué) il faut toujours avoir à l'esprit qu'il est susceptible de s'éjecter et que l'articulation intervertébrale souffrante peut être soumise à une mise en charge brutale et très importante.

7.2.3.8. Aptitude et thérapeutique

Les poussées arthrosiques douloureuses relèvent du repos, du traitement médicamenteux par les antalgiques, au besoin les anti-inflammatoires et décontractants. S'y associe ensuite, en général, une kinésithérapie visant à faire récupérer au rachis une souplesse satisfaisante et à agir sur les masses musculaires paravertébrales.

La mise en jeu de cette thérapeutique médicale s'accompagne, au moins en partie, d'une inaptitude temporaire assez courte qui n'a pas d'incidence de carrière.

Le traitement chirurgical seul pose des problèmes d'aptitude, en particulier chez le pilote de chasse.

La cure chirurgicale d'une hernie discale s'avère parfois nécessaire. Celle-ci doit être pratiquée par un chirurgien averti des problèmes aéronautiques ou conseillé par un Médecin de l'Air.

La pratique d'une laminectomie entraîne une inaptitude définitive à l'aviation de chasse, et plus spécialement au siège éjectable.

Il est possible de pratiquer une cure de hernie discale sans laminectomie, ou avec laminectomie a minima, sans dégât osseux ou ligamentaire notable.

Le résultat doit se juger sur les données cliniques (absence de séquelles neurologiques, sensitivo-motrices) et radiotomographiques.

L'intervention doit être suivie d'une kinésithérapie prolongée reconstituant une bonne musculature paravertébrale.

Nous avons pu, dans ces conditions, faire opérer trois pilotes de chasse pour hernie discale de siège lombaire bas et leur rendre leur aptitude.

Conclusions /

L'arthrose vertébrale, affection fréquemment répandue, met rarement en cause l'aptitude du Personnel Navigant.

Parmi les facteurs péjoratifs pour l'aptitude, il faut retenir :

- les spécialités où le travail aéronautique représente un facteur agressif pour

la colonne. Il s'agit essentiellement des pilotes d'hélicoptère et de combat.

- la gêne fonctionnelle douloureuse, sans rapport avec les lésions radiologiques.
- sur le plan radiologique, des lésions de discarthrose importantes.
- les impératifs thérapeutiques qui n'excluent pas la chirurgie pratiquée dans des conditions convenables.

7.2.4. Spondylarthrite ankylosante

Sommaire particulier

- 7.2.4.1. Etiologie
- 7.2.4.2. Clinique
 - 1. Début
 - 2. Etat
- 7.2.4.3. Radiologie
- 7.2.4.4. Biologie
- 7.2.4.5. Formes cliniques
- 7.2.4.6. Complication
- 7.2.4.7. Evolution
- 7.2.4.8. Diagnostic
- 7.2.4.9. Aspects médico-aéronautiques de la spondylarthrite ankylosante.
 - 1. Généralités
 - 2. Admission dans le Personnel Navigant
 - 3. Visites révisionnelles
 - Critères cliniques
 - Critères aéronautiques.

7.2.4. La SPONDYLARTHRITE ANKYLOSANTE - S.P.A.

La spondylarthrite ankylosante est le plus fréquent des rhumatismes inflammatoires chroniques de l'homme. Elle atteint tout l'appareil locomoteur mais plus particulièrement l'axe rachidien, les sacro iliaques et les articulations des membres inférieurs.

7.2.4.1. Etiologie

Bien que l'étiopathogénie de la maladie reste encore obscure, les travaux récents démontrent qu'il existe un terrain génétique particulier, objectivé par l'antigène d'histocompatibilité HLA B 27, présent en moyenne chez environ 80% des sujets atteints, alors que ce pourcentage n'est que d'environ 4% chez les témoins caucasoïdes.

La fréquence de la spondylarthrite ankylosante est au moins de 1 sujet pour 2000 (WEST) en moyenne. Mais elle varie beaucoup suivant les régions géographiques, suivant les conditions de vie ou d'hygiène.

- L'âge du début clinique, également difficile à fixer, est en moyenne de 26 ans.
- Sexe : la spondylarthrite ankylosante frappe électivement le sexe masculin (9 fois sur 10).
- Répartition géographique : la spondylarthrite ankylosante très inégalement répartie à la surface du globe, est notamment particulièrement fréquente dans les pays qui bordent la Méditerranée. Inversement, elle paraît tout à fait exceptionnelle en Afrique Noire. Cette répartition géographique particulière traduit aussi

bien l'intervention d'un facteur extrinsèque lié à l'environnement que d'un facteur ethnique ou des deux à la fois.

- Facteurs favorisants (302)

. Les conditions d'hygiène défavorable rendent compte de la grande fréquence des spondylarthrites observées au cours et au décours des guerres.

. Les infections urinaires, digestives et mêmes certaines infections vénériennes pourraient conduire à la spondylarthrite ankylosante.

. Le syndrome de Fliessinger-Leroy-Reiter lié également à l'antigène HLA B 27, conduit plus ou moins rapidement, à la spondylarthrite ankylosante dans 30 à 50% des cas et plus. Le psoriasis est assez fréquemment associé à la S.P.A.

. La rectocolite hémorragique, la maladie de Crohn, la maladie de Whipple, la maladie de Behcet sont associées à la spondylarthrite ankylosante.

. Les traumatismes représentent parfois un facteur déclenchant favorisant ou révélateur de la spondylarthrite ankylosante.

7.2.4.2. Clinique (302)

1. Au début, la spondylarthrite ankylosante se traduit par des douleurs fessières, lombaires basses, dorsales, intercostales, cervicales, des sciatalgies unilatérales, bilatérales ou à bascule dont l'horaire (deuxième partie de la nuit) est particulièrement évocateur mais inconstant. Ces manifestations se succèdent ou s'associent dans le temps de façon extrêmement variable d'un cas à l'autre. Le début de la maladie peut également être marqué par une atteinte articulaire périphérique (25% des cas pour FORESTIER) du membre inférieur, plus rarement du membre supérieur, par une atteinte oculaire (iritis), par une talalgie, traduction d'une calcanéite.

2. A la période d'état, c'est à dire après plusieurs mois ou plusieurs années et surtout si la maladie n'a pas été reconnue et traitée, on constate l'existence de déformations débutantes du rachis avec cyphose cervico-dorso-lombaire, projection de la tête en avant, diminution de l'aplatissement thoracique.

7.2.4.3. L'examen radiologique fondamental montre au début une atteinte sacro-iliaque bilatérale avec érosion de la berge iliaque, pseudo élargissement de l'interligne, puis condensation et enfin ankylose totale. Au niveau du rachis seront recherchés soigneusement au début, les ébauches de syndesmophytes surtout à la charnière dorso-lombaire. Plus tard, le diagnostic sera évident avec la syndesmophytose étagée donnant l'aspect de la colonne " bambou " et les calcifications des ligaments inter-épineux et des articulations interapophysaires donnant l'image classique des " 3 rails ".

7.2.4.4. Biologie : la vitesse de sédimentation peut être augmentée mais il n'y a pas de parallélisme étroit entre l'accélération de la sédimentation et l'évolution clinique.

7.2.4.5. Formes cliniques : il existe un polymorphisme clinique, radiologique et évolutif tout à fait remarquable dans la spondylarthrite ankylosante. L'atteinte des articulations des membres est assez fréquente au cours comme au début de l'évolution. Surtout, les localisations coxo-fémorales conditionnent par leur gravité le pronostic fonctionnel. Les spondylodiscites se rencontrent dans 5% des cas. Elles peuvent prendre le masque d'un mal de Pott avec lequel le diagnostic différentiel est parfois très difficile.

7.2.4.6. Complications : De nombreuses complications émaillent parfois le cours de la maladie : oculaire (iritis) qui peut être inaugural, cardiaque (insuffisante aortique, troubles de la conduction auriculo-ventriculaire), pulmonaire (fibrose pulmonaire biapicale), neurologique périphérique ou centrale, laryngées, des fractures rachidiennes transdiscales ou transcorporeales surtout graves à l'étage cervical non exceptionnelles peuvent être responsables de certaines des complications neurologiques. L'amylose se rencontrerait dans 2 à 4% des cas.

7.2.4.7. L'évolution très lentement progressive soit de façon continue dans un tiers des cas, soit par poussées, est éventuellement émaillée des complications que nous avons énumérées.

7.2.4.8. Le diagnostic de la spondylarthrite ankylosante est très souvent très difficile. Au début, les manifestations radiologiques peuvent être longues à apparaître. Les signes fonctionnels restent très longtemps atypiques, avec des douleurs rachidiennes très banales d'allure mécanique, des sciatalgies d'allure radiculaire rebelle conduisant trop souvent à des explorations paracliniques intempestives (saccoradiculographies parfois itératives) voire à des interventions chirurgicales blanches tout à fait inopportunes.

Le diagnostic repose sur les données de l'interrogatoire soigneusement analysées, sur les résultats d'un examen clinique soigneux et sur d'excellentes radiographies éventuellement sur les scintigraphies osseuses montrant notamment une hyperfixation des

sacro-iliaques. La recherche de l'antigène HLA B 27 qui traduit l'existence d'un " terrain spondylarthritique " est parfois un argument d'appoint utile pour le diagnostic.

7.2.4.9. Aspects médico-aéronautiques de la spondylarthrite ankylosante

1. Généralités

Avant d'envisager les problèmes d'aptitude posés par la spondylarthrite ankylosante, quelques notions méritent d'être rappelées.

Cette affection touchant l'homme jeune, n'a pas une répartition géographique uniforme. Elle intéresse particulièrement les sujets vivant autour du bassin méditerranéen.

En cas de conditions de vie difficile, comme en réalisent les conflits armés, l'affection peut intéresser tous les pays. L'épidémie finlandaise de la 2ème Guerre Mondiale en est un exemple.

Sa fréquence dans le Personnel Navigant est donc variable d'un pays à l'autre et selon les circonstances. Bien que non chiffrée on peut la considérer comme très faible actuellement.

Sur le plan étiologique, il faut insister sur le rôle possible du traumatisme déclenchant ou aggravant. En règle générale, on s'accorde à reconnaître la responsabilité étiologique du traumatisme s'il a été important et si la spondylarthrite se manifeste dans un temps très court après celui-ci (DOURY)(302).

Ce rôle du traumatisme doit être pris en considération lorsque l'on discute de l'aptitude :

- chez le pilote d'hélicoptère soumis aux vibrations et aux difficultés posturales ;
- chez le pilote de chasse soumis aux accélérations et candidat potentiel à l'éjection ;

Enfin, il faut toujours avoir à l'esprit avant de prendre une décision d'aptitude :

- que la spondylarthrite ankylosante peut être une maladie générale qui déborde le cadre du rachis ;
- qu'elle peut relever d'étiologies qui sont en elles-mêmes causes d'inaptitude.

2. Admission dans le personnel navigant.

La découverte d'une spondylarthrite ankylosante lors de la visite d'admission doit entraîner une inaptitude définitive à tout emploi dans le personnel navigant. Ceci est justifié par les incertitudes évolutives de la maladie.

3. Visites révisionnelles

Il apparaît raisonnable de prendre les décisions d'aptitude en fonction de deux critères :

- la forme clinique de la maladie ;
- la spécialité aéronautique.

- Critères cliniques -

Quatre éléments peuvent être pris en considération :

- . l'importance de l'atteinte rachidienne
- . les lésions extra rachidiennes
- . l'étiologie
- . la thérapeutique.

L'importance de l'atteinte rachidienne : on sait qu'il n'y a pas toujours parallélisme dans cette affection plus périarticulaire ou articulaire entre la gêne fonctionnelle et les signes radiologiques. Aussi est-il très important de prendre en considération l'impotence fonctionnelle en rapport avec les douleurs et surtout la raideur rachidienne. Les déformations fixées, si elles existent, sont une cause d'inaptitude à tous emplois.

Les lésions extra rachidiennes sont un facteur de gravité qui entraîne une inaptitude temporaire ou définitive. Il faut s'appliquer à rechercher particulièrement :

- . Les atteintes articulaires extra rachidiennes, surtout coxofémorales,
- . Les atteintes oculaires,

. Les atteintes cardiaques. L'insuffisance aortique est en fait rare. Les troubles du rythme et de la conduction, plus fréquents, doivent être recherchés systématiquement par la pratique d'un enregistrement continu de l'E.C.G. pendant 24 heures.

. Le retentissement ventilatoire de l'atteinte du rachis dorsal doit être recherché systématiquement par spirométrie quelque soit l'état radiologique. L'aptitude se discute pour une réduction de la C.V. et du V.E.M.S. de l'ordre de 15 à 20% chez le pilote de transport.

. L'état inflammatoire doit également être pris en considération. L'existence d'un syndrome inflammatoire biologique avec V.S. accélérée, fibrinogène et taux des Alpha 2 globulines élevés, invite à prescrire le repos donc l'inaptitude temporaire.

Les étiologies intestinales ou extra intestinales mentionnées plus haut entraînent l'inaptitude à l'emploi de P.N. dans toutes les spécialités.

Aptitude et thérapeutique : la base du traitement comporte :

. la gymnastique vertébrale

. les médicaments anti-inflammatoires non stéroïdiens (ou la phénylbutazone tient une place de choix) avec leurs risques iatrogènes en particulier digestifs. La spondylarthrite ankylosante est une maladie chronique évoluant de façon continue ou par poussées. Les prises médicamenteuses seraient donc fréquentes et prolongées. Ceci doit peser lourdement dans la décision d'aptitude à long terme. En effet, toute nouvelle cure d'anti-inflammatoire doit entraîner une inaptitude temporaire et débiter en dehors des vols de façon à juger sa tolérance.

- Critères aéronautiques -

Chez le pilote d'hélicoptère : le travail aéronautique soumet l'axe vertébral à un travail constant, voir aux microtraumatismes répétés. Compte tenu par ailleurs de la fréquence des lombalgies chez ces pilotes, il est licite de prononcer une inaptitude définitive dans cette spécialité. Ne pas adopter cette conduite, si par exemple l'intéressé déclare ne plus souffrir, risque de conduire plus tard à un difficile problème médico-légal. Au mieux dans certains cas pourra-t-on délivrer une aptitude limitée dans le temps.

Chez le pilote de chasse : notre attitude est la même en tenant compte cette fois de l'agression représentée par les accélérations et les risques d'éjection. La découverte d'une spondylarthrite ankylosante, même bien tolérée, devrait conduire à l'inaptitude définitive. Comme précédemment, une dérogation pour une durée ne dépassant pas 1 à 2 ans, pourrait être accordée aux sujets en fin de carrière ne présentant pas une forme clinique grave.

La mise en service de nouveaux avions à haute performance est un argument supplémentaire pour proposer l'inaptitude définitive des pilotes de combat atteints de spondylarthrite ankylosante.

Chez le pilote de transport : la colonne vertébrale n'est pas spécialement exposée, ici c'est donc l'état clinique qui doit primer.

7.2.4.10. Conclusions :

Les décisions d'aptitude en matière de spondylarthrite ankylosante doivent être nuancées selon les cas. Il est important de tenir compte de la forme clinique de la maladie et de son aspect évolutif que l'on ne peut juger qu'avec un certain recul. La conséquence est qu'il est souvent nécessaire de temporiser et de prendre un recul de quelques mois avant de prendre une décision définitive.

Doivent être considérés comme particulièrement péjoratifs vis à vis de l'aptitude :

- certaines spécialités comme pilote d'hélicoptère ou d'avion de combat,
- une rigidité fixée de la colonne et à plus forte raison des déformations,
- les localisations extra rachidiennes,
- un syndrome inflammatoire biologique important,
- la notion d'un potentiel évolutif élevé,
- la reconnaissance d'une étiologie précise,
- les nécessités thérapeutiques.

7.2.5. Interventions chirurgicales /

7.2.5.1. Laminectomie (9)(70)(76)

De propos délibéré ou occasionnel, la laminectomie est une intervention chirurgicale qui a pour but d'explorer ou de décompresser la moëlle épinière. Elle laisse après une grande instabilité d'autant plus grande qu'elle intéresse plusieurs lames et qu'elle est plus étendue latéralement en direction des apophyses articulaires. La cause de la laminectomie (compression médullaire, tumeur) peut être en elle même une raison d'incapacité définitive.

Après laminectomie, l'incapacité définitive à tout emploi du personnel navigant doit être formulée. Le risque de voir survenir, sur une colonne déjà fragilisée, de nouveaux traumatismes au cours d'une carrière aéronautique nous paraît trop grand.

7.2.5.2. Cure de hernie discale (9)(70)(76)

Il s'agit d'une intervention qui, la plupart du temps, ne modifie pas profondément la solidité du rachis. Avant de prendre une décision, les experts doivent analyser avec soin le contenu du compte rendu opératoire et se baser sur les résultats des examens clinique et radiologique. Ils doivent exiger que l'opération n'ait entraîné qu'une laminectomie à minima, que le diagnostic de hernie discale ait été confirmé, que le disque intervertébral ait été bien cureté. Le résultat clinique doit être parfait avec restitutio ad integrum. En particulier, il ne doit pas exister de paresthésies résiduelles, d'algies persistantes. Les tomographies révèlent la présence de lésions osseuses séquellaires d'aspect satisfaisant.

Par contre, si les dégâts osseux ou ligamentaires sont importants, des décisions d'incapacité à l'emploi de pilotes d'avions de combat, d'hélicoptères, de parachutistes, doivent être prises. Si l'ablation de la hernie discale répond aux critères précédemment décrits, l'aptitude totale peut être maintenue.

7.2.5.3. Cure de spondylolisthésis (9)(70)(76)

Cette anomalie vertébrale peut être traitée chirurgicalement par ablation de l'arc postérieure. Mais un déséquilibre dans le fonctionnement du rachis apparaît. Les résultats opératoires de cette technique sont souvent médiocres car il persiste un syndrome douloureux. Le pilotage d'hélicoptère sera interdit et parfois l'incapacité définitive à tout emploi du P.N. sera décidée.

D'autres techniques (arthrodeèse antérieure en particulier) sont utilisables mais nous manquons de recul pour juger de leur efficacité sur les algies.

S'il n'existe pas de signes radiculaires, l'aptitude totale doit être maintenue.

7.2.6. Le problème de la répétition des éjections (201)(223)

doit être discuté.

Nous avons eu l'occasion de suivre médicalement et radiologiquement un pilote ayant été éjecté trois fois. Les deux premières éjections ont entraîné l'apparition de fractures à des niveaux différents (dorsal à la première, lombaire haut à la deuxième) La troisième s'est terminée par une fracture complexe des deux os de la jambe. D'autre part, plusieurs pilotes se sont éjectés deux fois. Dans ces traumatismes répétés, il s'agit toujours de fractures simples du rachis par tassement simple. L'activité aéronautique n'a été autorisée après consolidation. Ces répétitions des traumatismes sont très intéressantes à étudier. Dès maintenant, on peut affirmer qu'une fracture du rachis ne se reproduit pas sur la même vertèbre dans la mesure où il s'agit de répétitions de fractures simples n'entraînant pas de profondes modifications de la statique. Ces cas d'éjections multiples mériteraient d'être réunis pour une publication d'ensemble. Dans certaines Armées de l' Air, la décision d'incapacité est prise pour des raisons psychologiques après la troisième éjection. Pour notre part, nous estimons que le nombre de cas observés reste trop faible pour émettre une opinion définitive. De plus, nous ignorons les effets tardifs d'une éjection (44). Nous étudions cette évolution depuis 1960 (66)

Conclusion :

Les décisions de maintien d'aptitude, de déclassement ou même d'incapacité, doivent toujours s'adapter au cas clinique et psychologique particulier. Les confrontations entre médecins, radiologues et chirurgiens doivent peser avec soin les risques connus et la préservation légitime des intérêts du Personnel Navigant et de l' Armée.

De plus, ces problèmes d'aptitude évoluent dans le temps car il faut tenir compte des progrès de la médecine, de la chirurgie et également des nouvelles conditions du travail aéronautique (avion de combat moderne avec accélérations de grande amplitude et de longue durée).

CHAPITRE 8 : ASPECTS MEDICO-LEGAUX DES AFFECTIONS

RACHIDIENNES EN MEDECINE AERONAUTIQUE

P. DOURY, R. AUFFRET et R.P. DELAHAYE

SOMMAIRE

8.1. TRAUMATISMES ET ARTHROSE INTER VERTEBRALE

8.1.1. Traumatisme vertébral sans fracture

8.1.1.1. Traumatisme et arthrose

8.1.1.2. Arthrose cervicale post traumatique

8.1.1.3. Critères d'individualisation de l'arthrose post traumatique

8.1.2. Traumatisme vertébral et fracture.

8.2. TRAUMATISMES ET RHUMATISMES INFLAMMATOIRES

8.2.1. Observations

8.2.2. Critères d'individualisation

8.3. SPONDYLOLISTHESIS ET TRAUMATISMES

8.3.1. Anatomie pathologique

8.3.2. Pathogénie

8.3.2.1. Théorie congénitale

8.3.2.2. Théorie trophostatique

8.3.2.3. Théorie traumatique

8.3.2.4. Théorie de la dysplasie héréditaire

8.3.3. Conclusions

L'esprit revendicatif des pilotes est généralement utilisé pour réclamer une aptitude au vol plus que pour quémander une pension

R. AUFFRET, Ch. GIGNOUX, R.P. DELAHAYE (10)

Les aspects médico-légaux des affections rachidiennes en médecine aéronautique trop souvent méconnus, méritent une étude particulière. En effet, pendant toute leur carrière, les membres du personnel navigant tiennent à garder leur aptitude aux services aériens, non seulement pour des raisons financières ou d'avancement, mais surtout semble-t-il pour la plupart, par leur amour du métier aéronautique. Cette tendance spontanée à " minorer " toute symptomatologie pour que l'aptitude au vol soit maintenue, fait disparaître trop souvent toute une symptomatologie intéressante. Par le processus de filiation, c'est à dire de la continuité du traitement, certaines algies vertébrales pourraient être attribuées certainement à une aggravation par le service aérien ou être la conséquence d'une action chronique des facteurs nocifs du vol. Les vibrations jouent un rôle beaucoup plus important qu'on ne le pensait il y a 30 ans.

Nous étudierons successivement :

- les traumatismes et l'arthrose intervertébrale
- les traumatismes et les rhumatismes inflammatoires,
- le spondylolisthésis et ses rapports avec le traumatisme.

8.1. TRAUMATISMES ET ARTHROSE INTERVERTEBRALE

L'arthrose intervertébrale est une affection extrêmement répandue. Les facteurs mécaniques jouent un rôle important dans sa genèse. Le problème de l'arthrose post traumatique se trouve donc posé.

Il est différent selon qu'il y ait une fracture récente dans les antécédents traumatiques ou que le traumatisme si violent soit-il n'ait pas créé de fractures.

8.1.1. Traumatisme vertébral sans fracture

8.1.1.1. Arthrose et traumatismes :

Le surmenage des disques intervertébraux et des articulations interapophysaires par les microtraumatismes de la vie courante, éventuellement favorisé par les troubles statiques ou les anomalies vertébrales congénitales, rend compte de la constitution de l'arthrose intervertébrale.

La qualité du cartilage liée vraisemblablement à des facteurs génétiques explique que l'existence, l'âge de survenue et l'importance de la détérioration des disques intervertébraux et des articulations interapophysaires varient extrêmement d'un cas à l'autre.

Si l'arthrose intervertébrale peut incontestablement être en rapport direct et pratiquement exclusif avec un traumatisme unique et important du rachis, on comprend qu'il soit souvent très difficile de prouver ce lien direct et exclusif, base d'une éventuelle indemnisation.

Même si l'on apporte la preuve par des études statistiques que la fréquence de l'arthrose intervertébrale est plus grande dans un groupe de sujets soumis à un surmenage rachidien d'origine professionnelle (cas des pilotes d'hélicoptères) par rapport à un groupe de sujets témoins, il ne peut en découler ipso facto chez un individu donné, porteur d'une arthrose rachidienne, quele fait d'appartenir à ce groupe soit une preuve que l'arthrose est en rapport directement et exclusivement avec ce facteur de surmenage professionnel.

Pour un traumatisme unique et important, le problème est apparemment plus simple. L'expert, néanmoins doit apporter la preuve du lien direct et exclusif entre le traumatisme et l'arthrose intervertébrale consécutive. Il est donc nécessaire de posséder des critères précis et indiscutables pour établir et affirmer la responsabilité directe et exclusive d'un traumatisme dans l'apparition d'une arthrose intervertébrale.

8.1.1.2. Arthrose cervicale post traumatique

L'observation suivante est à cet égard intéressante car elle semble démontrer la réalité de l'arthrose rachidienne post traumatique :

OBS : Monsieur C....., ancien pilote de l'armée de l'air, âgé de 61 ans, a subi en 1954 un accident majeur : crash au cours d'un vol opérationnel. Il est éjecté de

l'appareil qui explose peu après. Lorsqu'il est relevé, il ne souffre que de quelques contusions et ecchymoses apparemment sans gravité.

8 jours après l'accident, le sujet se plaint de cervicalgies aiguës diffuses sans irradiations. Les radiographies du squelette notamment du rachis cervical ne montrent aucune anomalie. La poussée douloureuse dure 15 jours.

De 1954 à 1956, le sujet ne souffre pas.

En 1956, à l'occasion d'un faux mouvement il présente une nouvelle poussée de cervicalgies aiguës : de nouvelles radiographies du rachis cervical montrent une très importante cervicarthrose avec affaissement du disque C6.C7, uncarthrose C5.C6.C7 avec condensation et déformations des uncus et ostéophytose déformant les trous de conjugaison.

Depuis 1956, le patient présente des poussées récidivantes de radiculaires cervico-brachiales gauches avec céphalées, cervicalgies, vertiges, acouphènes et limitation douloureuse du rachis cervical.

Les examens complémentaires, ophtalmologiques, ORL et électroencéphalographiques sont normaux.

Malgré le délai de 2 ans entre le traumatisme et la constatation de la cervicarthrose il semble qu'ici on puisse admettre le rôle du traumatisme dans la genèse de cette très importante arthrose cervicale récemment apparue.

Dans un travail présenté au IV^e Congrès International de Médecine du Trafic, DOURY et PATTIN (300) ont montré la rareté de la cervicarthrose post traumatique : il s'agissait d'une étude rétrospective portant sur une série de 100 cervicarthroses. Sur ces 100 cas, 91 n'avaient jamais subi le moindre traumatisme, 9 avaient eu un traumatisme cervical dans leurs antécédents plus ou moins éloignés (1 à 7 ans). Ce traumatisme précisé dans 7 cas était une hypermobilisation sagittale dans 6 cas, un choc latéral dans 1 cas, dans 2 cas il n'était pas précisé. Les 2 groupes (91 sans traumatisme et 9 avec traumatisme) ne différaient pas en ce qui concerne l'âge, le sexe, la symptomatologie fonctionnelle et les anomalies radiologiques, qui siégeaient exclusivement en C5.C6.C7, avec une fréquence à peu près égale de l'ostéophytose antérieure (3/4 des cas), des pincements discaux uniques ou multiples, des déformations arthrosiques des uncus (3/4 des cas) et de l'arthrose interapophysaire (1/3 des cas)

Il faut ajouter que la cervicarthrose était connue du malade avant l'accident dans 6 cas sur 9. L'évolution clinique et radiologique n'a pas comporté de différences notables dans les deux groupes.

8.1.1.3. Critères d'individualisation de l'arthrose post traumatique

Pour pouvoir retenir l'étiologie traumatique éventuelle d'une arthrose intervertébrale, il faut réunir les conditions suivantes (DOURY et PATTIN)(300) :

- 1°) Manifestations fonctionnelles apparues immédiatement après l'accident ou après une période de latence courte de quelques jours à quelques semaines après l'accident.
- 2°) Intégrité radiologique au moment du traumatisme (en dehors des troubles de la statique rachidienne d'interprétation difficile)
- 3°) Apparition dans les semaines ou les mois qui suivent le traumatisme d'une ostéophytose ou d'un pincement de l'interligne ou d'une arthrose interapophysaire avec condensation et pincement d'un ou plusieurs interlignes.
- 4°) Sièges inhabituels de l'atteinte cervicale C2.C3 ou C3.C4 ou même C4.C5 ou C6.C7 plus rarement.
- 5°) Aggravation manifeste des anomalies radiologiques éventuelles préexistantes au traumatisme, dans les semaines ou les mois qui suivent celui-ci.

8.1.2. Traumatisme vertébral avec fracture

La relation d'imputabilité entre l'accident et la fracture vertébrale ne se discute généralement pas pour les fractures découvertes immédiatement après le traumatisme dû à une pratique aéronautique : crash; éjection; parachutisme; accidents vibratoires rapides (pompages). Grâce à l'examen radiographique pratiqué systématiquement les fractures sans signe clinique ne passent pas inaperçues.

Les fractures vertébrales se compliquent parfois d'arthrose vertébrale mais cette évolution n'est pas constante. Elle n'apparaît que si le disque intervertébral a été touché dans le traumatisme.

Cette arthrose post traumatique chez des sujets porteurs de fracture vertébrale ne possède pas de caractères spécifiques tant cliniques que radiologiques.

Les critères définis par DOURY et PATTIN sont valables en insistant sur l'atteinte fréquente de l'interligne sus-jacent au foyer fracturaire où existe fréquemment un coin antérieur détaché. Ex : une fracture de L1 peut s'accompagner d'un pincement de l'interligne D12-L1.

Ces lésions d'arthrose vertébrale apparaissent très précocement sous forme d'ostéophytose

(cas le plus fréquent) sous forme de syndesmophytose. Nous en avons suivi un cas (238) où l'arthrose est apparue un mois et demi après un traumatisme particulièrement sévère (éjection à 650 knots et arrivée au sol dans le coma). Les délais d'apparition de cette arthrose post fracturaire varient de quelques semaines à 6-12 mois après le traumatisme souvent violent.

8.2. TRAUMATISMES ET RHUMATISMES INFLAMMATOIRES

8.2.1. Observations

Le problème des liens entre les traumatismes et la survenue d'un rhumatisme inflammatoire sont très importants.

La fréquence des rhumatismes inflammatoires post traumatiques est faible, de l'ordre de 3 à 4% selon l'affection en cause.

On a signalé de rares cas de rhumatisme articulaire aigu et de syndrome de Fiessinger Leroy Reiter avec traumatisme inaugural. La polyarthrite rhumatoïde, la spondylarthrite ankylosante, peuvent également être déclenchées par un traumatisme comme dans les deux observations suivantes :

OBS : L..... Maurice, sans antécédents, 30 ans, pilote d'hélicoptère, fait une chute d'hélicoptère en 1960. Ejecté de l'appareil, il présente un traumatisme majeur du rachis mais les radiographies du squelette montrent l'absence de toute anomalie, notamment l'absence de fracture. Durant 8 jours, les douleurs sont très vives au niveau du rachis dorso-lombaire, l'impotence fonctionnelle est totale. Puis durant 3 ans, les douleurs qui s'étaient atténuées sans disparaître totalement vont évoluer par poussées sur un fond douloureux permanent.

En 1960, soit 3 ans après l'accident, le malade est hospitalisé avec une symptomatologie typique d'une spondylarthrite ankylosante. Les radiographies montrent une arthrite sacro-iliaque bilatérale au stade II, des syndesmophytes en D11.D12, D12.L1 et L4.L5 antérieures et latérales.

L..... Jean, 56 ans, sans antécédents, est victime d'un accident d'avion en mai 1940, il subit un traumatisme très violent du rachis, sans fracture. Les lombalgies consécutives au traumatisme persistent avec des poussées hyperalgiques sur fond douloureux permanent avec exacerbation nocturne.

En 1966, apparaissent des cervicalgies à horaire inflammatoire.

En 1970, devant la persistance des douleurs le malade est hospitalisé. Il existe une cyphose cervico-dorso-lombaire avec distance doigt-sol à 34 cm, distance occiput-mur à 14 cm, distance menton-sternum à 5 cm, ampliation thoracique à 5 cm. Les radiographies confirment le diagnostic de spondylarthrite ankylosante avec arthrite sacro-iliaque bilatérale au stade III, syndesmophytose étagée cervico-dorso-lombaire.

En fait, dans la spondylarthrite ankylosante comme dans les autres rhumatismes inflammatoires, avec traumatisme inaugural, celui-ci n'est pas la cause première de la maladie. D'ailleurs les traumatismes du rachis si fréquents sont exceptionnellement responsables, même apparemment, du déclenchement d'une spondylarthrite ankylosante. Le traumatisme constitue donc un facteur favorisant, une cause seconde (302)

8.2.2. Critères d'individualisation

Pour admettre le rôle d'un traumatisme dans le déclenchement d'une spondylarthrite ankylosante, il faut que soient satisfaits les critères suivants (DOURY et PATTIN) (299)(328).

- 1°) que le traumatisme ait été violent,
- 2°) que le sujet ait été en bonne santé avant l'accident,
- 3°) que les douleurs déclenchées par le traumatisme persistent durant plusieurs semaines ou plusieurs mois, débouchant sur la constitution d'une spondylarthrite ankylosante ou éventuellement sur l'aggravation d'une spondylarthrite ankylosante jusque là totalement quiescente.

8.3. SPONDYLOLISTHESIS ET TRAUMATISME

Le spondylolisthésis (voir 7.1.5.3.) lorsqu'il est découvert en cours de carrière pose deux problèmes (282) :

- cette lésion est-elle susceptible d'être en rapport avec le travail aérien ou un traumatisme aéronautique ?
- cette lésion connue à l'admission au personnel navigant peut-elle évoluer et quels seront les critères médicaux permettant d'établir une indemnisation ?

8.3.1. Anatomie pathologique (282)(305)(307)(331)(348)(351)(416)

La lésion isthmique est un hiatus interrompant la continuité vertébrale et divisant la cellule en deux segments qui ne sont plus solidaires l'un de l'autre. Le segment antérieur sollicité par le poids du corps et les efforts auxquels il est soumis, glisse en avant entraînant avec lui le rachis sus jacent. Le segment postérieur par contre, maintenu en arrière par les apophyses articulaires supérieures de la vertèbre sous jacente, ne bouge pas (DR SEZE et DURIEU)(420).

La liste isthmique ou spondylolyse est une perte de substance osseuse au niveau de l'isthme remplacé par du tissu fibreux limité de part et d'autre par deux surfaces régulières, lisses, émoussées mais dont la structure osseuse est normale. Ce tissu fibreux, dense, plus ou moins riche en fibroblastes, présente souvent des inclusions cartilagineuses chez l'enfant. Le passage du tissu fibreux au tissu osseux se fait brusquement, sans transition.

La lyse isthmique n'a donc pas l'aspect d'un cal, d'une pseudarthrose, d'une nécrose osseuse ou d'une zone de remaniement. Cette lyse s'accompagne d'une déformation de l'isthme qui est allongé, aminci, étiré et d'une mobilité anormale de l'arc postérieur.

8.3.2. Pathogénie du spondylolisthésis

Avec W. Taillard (435) nous distinguons quatre théories :

- la théorie congénitale soutenant que la lyse est un défaut de soudure des deux noyaux d'ossification de l'arc postérieur pendant la vie foetale ;
- la théorie trophostatique assimilant la lyse à une fracture de fatigue ou de " surcharge " due à un défaut de statique du rachis lombaire ;
- la théorie traumatique considérant que la lyse est une fracture symétrique non consolidée de l'isthme ;
- la théorie de la dysplasie héréditaire faisant de la lyse une anomalie d'ossification de l'isthme évoluant au cours de la croissance, sous l'influence conjuguée de facteurs mécaniques et génétiques.

8.3.2.1. La théorie congénitale : la théorie congénitale n'est plus admise à l'heure actuelle. Plusieurs constatations anatomiques vont à l'encontre de cette théorie :

- le spondylolisthésis et la spondylolyse n'existent jamais chez l'embryon, le foetus et le nouveau-né.
- l'arc postérieur ne possède qu'un seul point d'ossification
- le processus d'ossification de l'arc vertébral est celui d'une diaplyse, la maquette cartilagineuse étant envahie par des bourgeons vasculaires venant du canal vertébral.

Les rares observations décrites comme étant des lyses congénitales correspondent à des fentes situées à d'autres niveaux sur l'arc vertébral : spina bifida aperta, fente rétro-isthmique, fente du pédicule, solution de continuité entre l'arc et le corps vertébral. La lyse n'est donc pas une malformation congénitale de l'arc vertébral. Jamais présente à la naissance, elle semble déterminée par l'action d'un pêne.

8.3.2.2. La théorie trophostatique : Elaborée par MEYER-BURGDORFF (1931) reprise par NATHAN (385) en 1959, elle fait de la spondylolyse une " fracture lente " de l'isthme induite par une surcharge mécanique chronique due à l'hyperlordose. Si ce mécanisme n'est pas habituel, un certain nombre de faits et d'observations mettent en évidence le rôle d'une surcharge chronique de l'isthme.

PIWNICA et GUILLOT (1958) (cités d'après 282) démontrent, par des recherches expérimentales sur des modèles de plastique, une concentration massive des lignes de force dans la portion interarticulaire de L5 en charge.

TAILLARD (435, 436) rapporte deux cas de lyse apparus après une modification de la lordose lombaire chez des adolescents en période de croissance et apparaissant dans un délai de 2 à 10 ans après une intervention chirurgicale sur le rachis comme une laminectomie ou une greffe lombo-sacrée. Il collige une quinzaine d'observations similaires dans la littérature de 1950 à 1963.

La lyse est plus fréquente chez les sujets qui, dans leur enfance, forcent les mouvements de leur rachis lombaire, comme les artistes de cirque ou de cabaret. De plus, la spondylolyse et le spondylolisthésis semblent être le privilège de l'homme et de sa position debout. En effet, on ne les trouve pas chez les autres mammifères qui, par ailleurs, présentent les mêmes troubles de croissance et de déchéance du rachis.

On ne peut pas considérer cette théorie comme une explication habituelle car elle s'appuie sur des observations exceptionnelles. Néanmoins, on doit en retenir un

" facteur de surcharge " dans la pathogénie de la spondylolyse.

8.3.2.2. La théorie traumatique

Deux problèmes doivent être discutés :

- le traumatisme peut-il créer une spondylolyse ou un spondylolisthésis sur un rachis primitivement normal ?
- le traumatisme peut-il aggraver une malformation préexistante ?

Apparition post-traumatique d'une spondylolyse ou d'un spondylolisthésis

Les observations authentiques sont exceptionnelles (Newmann, Sicard, Serre, Gérard) (282). Le cliché pris avant le traumatisme démontre l'intégrité de l'arc postérieur.

Les radiographies pratiquées après le traumatisme révèlent l'existence d'une lyse et d'un glissement indiscutables. Dans la dizaine de cas démonstratifs publiés, il s'agit de patients victimes de traumatismes très importants : chute brutale d'un parachutiste (Serre)(418), chute d'un troisième étage d'un immeuble, accidents graves de la circulation (éjection en dehors d'un véhicule).

L'origine traumatique de la lyse, si elle est indiscutable dans certains cas doit être considérée comme exceptionnelle. Il faut reconnaître que la comparaison avec des radiographies antérieures est peu probante, car il s'agit le plus souvent de clichés de face et de profil et seuls les clichés de 3/4 en double obliquité pourraient apporter la certitude.

L'isthme de L5 est un segment osseux très résistant comme le prouvent les travaux expérimentaux et les études d'importantes statistiques de fractures du rachis.

Guillemet (329) a précisé les caractéristiques du spondylolisthésis traumatique : apparition après un traumatisme très violent ; lésions évoquant la luxation ; fracture atteignant le corps des isthmes et parfois les articulaires ; association constante avec des fractures des transverses (401).

Azema et Gerlach essayant de provoquer une fracture de l'isthme en frappant à grands coups de mallet sur des colonnes vertébrales maintenues dans divers plans, arrivent à tout casser sauf l'isthme (282)(427).

Ghormley et Hofman sur 823 fractures du rachis lombo-sacré ne trouvent que 90 lésions intéressant l'arc postérieur de L5, mais pas une seule fracture de l'isthme de L5(282) (427).

Dans les statistiques des HIA Percy, Dominique Larrey et de Bégin (voir chapitre 5) il n'a pas été noté de lésion isolée de l'isthme de L5. Simonin (428) sur une série de 727 cas de spondylolisthésis ne rencontre qu'un seul cas où l'origine traumatique est certaine.

Le traumatisme peut-il aggraver une malformation préexistante ?

Le spondylolisthésis peut de façon tout à fait exceptionnelle apparaître après un traumatisme chez un sujet porteur d'une spondylolyse de L5 antérieurement connue, ou être aggravée de façon discrète par un traumatisme (observations de Francillon, Taillard, Friberg, Sicard) (282). Dans ce dernier cas, il se produit une discrète accentuation du glissement de l'ordre de 1 à 2 millimètres qui est due, semble-t-il plus à un écrasement du disque L5.S1 qu'à un véritable déplacement en avant du corps de L5 (438).

En regard de ces faits rares, il est beaucoup plus fréquent de constater la stabilité d'une spondylolyse ou d'un spondylolisthésis à la suite d'un traumatisme suffisamment important pour entraîner des fractures multiples des segments vertébraux voisins.

Chez l'adulte tout au moins, même les vertèbres atteintes de spondylolyse sont très stables. Le spondylolisthésis, rarement, apparaît si tous les éléments de l'articulation intervertébrale cèdent. Le plus souvent, les lésions de spondylolisthésis ne sont pas modifiées, même par des traumatismes importants (Lance) (352)(354)(355)(356). Effectivement, nous avons eu l'occasion de vérifier cette affirmation chez des pilotes porteurs de spondylolisthésis du type I après des accidents aériens (éjection, crash).

8.3.2.4. La théorie de la dysplasie héréditaire

Cette théorie proposée par Neugebauer en 1881 formulée par Brocher (1951)(266) et Wiltse (1962)(452, 453) soutenue par Taillard, fait de la lyse un trouble de la croissance de l'isthme qui s'ossifie de façon anormale sous l'influence conjuguée de facteurs mécaniques et génétiques. Elle paraît actuellement la plus satisfaisante car elle explique :

- l'absence de lyse chez le nouveau-né, son apparition et son évolution chez l'enfant

et l'adolescent ; par la suite, elle permet de comprendre la stabilité des lésions chez l'adulte ;

- l'association de la lyse à d'autres malformations, en particulier de l'isthme qui est aminci ou allongé ;
- la fréquence relativement constante dans les diverses races ;
- l'étude anthropologique : la spondylose ne s'observe que chez l'homme ; elle semble liée à la station debout ; elle se développe simultanément avec la lordose lombaire ; elle commence à apparaître dès que l'enfant marche ;
- la localisation aux segments les plus sollicités du rachis (L5.S1) alors que la lyse, rarissime au rachis cervical, n'existe pas au niveau du segment dorsal de la colonne vertébrale (276).

Cette théorie permet de comprendre le caractère familial de l'affection (Miltse, Puck, Rogers) qui trouvent une fréquence plus élevée des spondylolyses dans certaines familles et dans les ethnies particulières comme les esquimaux). En effet, la consanguinité des mariages est fréquente dans cette population. La transmission semble s'effectuer selon un mode dominant avec une expressivité très variable (Taillard) (435, 436, 437).

8.3.3. Conclusions

Avec P. LANCE (355) nous noterons que le spondylolisthésis d'origine traumatique n'existe que dans des conditions tellement exceptionnelles que cette étiologie exige pour être admise " des preuves dont le poids soit en rapport avec la rareté du phénomène " (Cl BERNARD).

Le traumatisme aggrave exceptionnellement un spondylolisthésis de L5 sur S1. Nous avons pu suivre, au cours de leur carrière aéronautique, une dizaine de pilotes porteurs de cette anomalie congénitale qui ont eu plusieurs accidents aériens (crashes ou éjections).

Le rôle du traumatisme est très fréquent dans le déclenchement d'un syndrome douloureux chez un sujet porteur d'un spondylolisthésis jusque là indolore.

Il faut que la réalité du traumatisme soit établi (275)(282) et que l'apparition des troubles subjectifs se situe dans les semaines qui suivent le traumatisme. Un intervalle libre entièrement muet pendant plus de deux mois pour P. Lance (355) constitue un argument suffisant pour rejeter l'imputabilité réclamée par le blessé. En expertise, il faudra attacher une grande importance aux données fournies par les examens radiologiques qui permettent d'impliquer le traumatisme, ou bien comme cause de la lésion primitive, ou simple comme aggravation d'une lésion préexistante.

8.4. LA RADIOLOGIE POST MORTEM

intervient parfois dans l'étude des accidents. Elle peut fournir des données intéressantes permettant soit de retrouver des éléments permettant d'élucider et déterminer le mécanisme physiopathologique ou de découvrir des fractures méconnues du rachis (32)(121)(168)(217). Ces examens radiographiques parfois difficiles à entreprendre complètent très bien les études anatomopathologiques (167) et biochimiques toujours indispensables.

C O N C L U S I O N

Le rachis du pilote, du parachutiste est soumis à deux types d'agression :

- des agressions d'intensité relativement faible dont les effets s'ajoutent et s'apparentent aux phénomènes observés dans la fatigue des matériaux ;
- des agressions exceptionnelles (crash, éjection, phénomènes vibratoires rapides) d'intensité très élevée mettant en jeu la résistance mécanique de la colonne vertébrale et pouvant causer des fractures.

La fréquence, la variété étiopathogénique, la symptomatologie clinique et radiologique, les différentes formes cliniques des affections traumatiques de la colonne vertébrale en aéronautique, doivent être bien connues du flight surgeon. L'étude de ce chapitre important en médecine aéronautique avec les années et malgré les progrès observés dans le diagnostic, le traitement et parfois la prophylaxie devra être poursuivie encore pendant de nombreuses années. Les variations du travail aérien, les performances des nouveaux avions, entraîneront peut-être des modifications dans les différents aspects physiques, cliniques et radiologiques des atteintes traumatiques du rachis. Les travaux cliniques et radiologiques qui ont tant fait évoluer nos connaissances devront peut-être continués et il est fortement souhaitable que ce travail multi-disciplinaire associant cliniciens, radiologistes, physiciens pilotes, doit être continué.

Les études des séquelles devraient être facilitées par une meilleure compréhension du personnel navigant trop soucieux de conserver son aptitude et ayant trop tendance à camoufler la symptomatologie résiduelle des traumatismes vertébraux.

Le chapitre 7 montre comment nous pouvons élaborer une doctrine simple, valable à la visite d'admission en envisageant successivement des degrés d'aptitude qui diffèrent selon la fonction du pilote (avion de combat, avion de transport, hélicoptère). Nous savons que ce point de vue n'est pas partagé par tous les médecins et encore moins par les Etats-Majors.

Quoiqu'il en soit, la radiologie joue un rôle indispensable et fondamental. Sa place ne se discute plus à la visite d'admission où l'examen est systématique. Elle s'est imposée dans le bilan, qu'il soit précoce ou tardif, des traumatisés.

Les études expérimentales devront être poursuivies pour améliorer les conditions du pilotage des hélicoptères, pour faciliter une meilleure survie dans les crashes et diminuer le nombre de fractures du rachis survenant après éjection.

- ILLUSTRATIONS -

- Figure 1 : Vertèbre de fœtus au moment où commence l'ossification de la pièce cartilagineuse d'après L. TESTUT (442)
- Figure 2 : Ossification et développement d'une vertèbre lombaire vue de face (d'après R. PATURET)
- Figure 3 : Ossification et développement d'une vertèbre lombaire vue de profil (d'après R. PATURET)
- Figure 4 : Morphologie d'une vertèbre dorsale ou lombaire (d'après R. PATURET)
- Figure 5 : Architecture d'une vertèbre vue d'en haut d'après GALLOIS et JAPIOT (442)
- Figure 6 : Architecture d'une vertèbre vue de profil d'après GALLOIS et JAPIOT (442)
- Figure 7 : ATLAS a) vue antérieure
b) vue d'en haut
- Figure 8 : Axis a) vue antérieure
b) vue latérale gauche
- Figure 9 : Septième vertèbre cervicale vue d'en haut
- Figure 10 : Vertèbres dorsales de face (sur des radiographies)
- Figure 11 : Vertèbre dorsale de profil D8 sur des radiographies
- Figure 12 : Orientation des articulations apophysaires
a) face supérieure du corps de L2 vue d'en haut
b) face supérieure du corps de L5 vue d'en haut
- Figure 13 : Calque de la radiographie d'ensemble du rachis lombaire en incidence de face postéro-antérieure
- Figure 14 : Rachis de profil (d'après R. COLIEZ -288-)
- Figure 15 : Sacrum
- Figure 16 : Le disque intervertébral
- Figure 17 : Le disque intervertébral lombaire (vue antérieure)
- Figure 18 : Coupe de deux vertèbres lombaires, des ligaments d'après EPSTEIN (307)
- Figure 19 : Visibilité du ligament commun postérieur d'après EPSTEIN (307)
- Figure 20 : Le ligament jaune à la colonne cervicale d'après GERLOCK
- Figure 21 : Les ligaments capulaires, le ligament jaune et les ligaments interépineux d'après GERLOCK
- Figure 22 : Le ligament vertébral commun postérieur au cou d'après GERLOCK
- Figure 23 : Les ligaments vertébraux communs antérieur et postérieur au cou
- Figure 24 : Les ligaments sacrolombaires
- Figure 25 : Statique sagittale de l'ensemble du rachis montrant les trois courbes cervicale, dorsale et lombaire (285)
- Figure 26 : Principaux repères du rachis de face d'après R. COLIEZ (285)
- Figure 27 : Principaux repères du rachis de profil d'après R. COLIEZ (285)
- Figure 28 : Pression intradiscale mesurée par une sonde manométrique introduite dans le nucléus pulposus d'une unité fonctionnelle de cadavre d'après A. NACHEMSON (383)
- Figure 29 : Schéma du sens de la répartition des pressions exercées sur le nucléus pulposus et des déformations du disque intervertébral
- Figure 30 : Schéma du déplacement et des déformations du nucléus pulposus et de l'anneau fibreux au cours des mouvements de la colonne vertébrale d'après R. PATURET (285)
- Figure 31 : Saillie du disque en Flexion et en Extension d'après T. BROWN et Coll. (267)
- Figure 32 : Fluage du disque d'après L.E. KAZARIAN (344)

- Figure 33 : Bandes d'HYSTERESIS des tissus biologiques limitées par la charge et la déformation d'après HARTUNG et ANNA O. (332)
- Figure 34 : Essai de résistance en fonction de la durée avec charges et décharges limitées par la déformation : la charge maximale diminue d'après HARTUNG et ANNA O. (332)
- Figure 35 : Pression discale in vivo (L3) d'après NOCHEMSON A.L. (383)
- Figure 36 : Comportement biomécanique du disque lésé
- Figure 37 : Résistance à la compression -d'après A.A. WHITE III et M.M. PANJABI (449)
- Figure 38 : Contraintes induites par FLEXION - d'après A.A. WHITE III et M.M. PANJABI (449)
- Figure 39 : Relation entre tissu osseux et résistance vertébrale
- Figure 40 : Résistance relative de deux composantes du corps vertébral : la coque cervicale et la partie spongieuse -d'après S.D. ROCKLOFF et J. BLEUSTEIN (408)
- Figure 41 : Mécanisme de rupture du plateau vertébral d'après A.A. WHITE III et A.A. PANJABI (449)
- Figure 42 : Représentation d'un modèle de couplage au niveau de la colonne lombaire d'après KRAG cité d'après (449)
- Figure 43 : Rôle des facettes articulaires d'après A.A. WHITE III et A.A. PANJABI (449)
- Figure 44 : Orientation caractéristique des facettes articulaires dans les régions cervicale, dorsale et lombaire d'après (449)
- Figure 45 : Activité musculaire en antéflexion. L'antéflexion est un mouvement en 2 temps sollicitant à la fois le rachis et le pelvis.
- Figure 46 : Classification des accélérations en fonction des axes du corps humain
- Figure 47 : Temps de tolérance en fonction du nombre de Jolts pour différentes valeurs d'accélération G_z+
- Figure 48 : TOLERANCE aux accélérations G_x d'après J.P. STAPP (233)
- Figure 49 : Tolérance aux accélérations $G_z +$ d'après J.P. STAPP (233)
- Figure 50 : TOLERANCE aux accélérations $G_z +$ d'après J.P. STAPP (233)
- Figure 51 : Tolérance aux accélérations $G_z -$ d'après J.P. STAPP (233)
- Figure 52 : Courbes de tolérance subjective pour les vibrations sinusoïdales verticales
- Figure 53 : Tolérance aux vibrations sinusoïdales
- Figure 54 : Mécanisme des fractures du rachis dorso-lombaire d'après WATSON - JONES (448)
- Figure 55 : Mécanisme des fractures du rachis cervical ab par extension d'après G. LAVARDE (359)
- Figure 56 : Mécanisme des fractures du rachis cervical C.D. par flexion d'après G. LAVARDE (359)
- Figure 57 : Effet de la décélération lorsque le corps est maintenu par la ceinture abdominale d'après D.J. RYER in Gillies (106)
- Figure 58a : Courbes de survie liées aux vitesses d'impact d'après W. JOANSON et A.G. MAMALIS (140)
- Figure 58b : Aire de déplacement antérieur avec une ceinture abdominale d'après schémas relevés dans onze accidents d'aviation - d'après SWEARINGHAM (140)
- Figure 59 : Répartition des accidents d'hélicoptères civils aux U.S.A. d'après R.G. SNYDER (232)
- Figure 60 : Accélérations en fonction du temps -Ejection à l'aide de 2 sièges différents (Standard MK 4 et fusée AM6)
- Figure 61 : Différentes phases successives de l'évacuation par siège éjectable
- Figure 62 : Dispositif de rappel de jambe
- Figure 63 : Déclenchement de l'éjection (commande haute)
- Figure 64 : Départ du siège éjectable (déclenchement par rideau)
- Figure 65 : Départ de l'éjection par commande basse
- Figure 66 : Pic maximal de la décélération en fonction de la vitesse équivalente (E.V.) pour un ensemble de 0,6 m² de surface frontale et d'un poids de 150 Kg - d'après MOHRLOCK

- Figure 67 : Taux de décroissance de la décélération en fonction du temps - d'après MOHRLOCK
- Figure 68 : Séparation siège - pilote (d'après document U.S.)
- Figure 69 : Vitesse limite d'un parachutiste en chute libre en fonction de son poids et de sa position
- Figure 70 : Statistique Norking Group Spinal Injury after Ejection (9)
- Figure 71 : Statistique des troupes aéroportées françaises d'après M.J. TEYSSANDIER et R.P. DELAHAYE (240)
- Figure 72 : Fractures du rachis avec le même type de siège M.K.J.5 selon différentes années U.S. Army, U.S. Navy, British Navy (9)
- Figure 73 : Schéma dessiné à partir de radiographies de cadavres sectionnés d'après LATHAM (1957) in Gillies (106)
- Figure 74 : Angle inclus entre axe de poussée et axe de rachis d'après GILLIES (106)
- Figure 75 : Profils d'accélération avec plusieurs types de coussin d'après LATHAM (157)
- Figure 76 : Ejection à travers verrière avec siège M.K.4 (LAMAS Centre d'Essais en Vol de Brétigny)
- Figure 77 : Importance du choc à l'ouverture en fonction de l'altitude (voilure de 28 pieds)
- Figure 78 : Schéma indiquant les différentes causes de lésions dues au pilote ou au siège apparaissant au départ du siège
- Figure 79 : Sortie d'avion gros porteur Nord 2501 chuteur confirmé
- Figure 80 : Parachutiste en position de dérive maximale
- Figure 81 : Ouverture d'un parachute commandé après une chute libre
- Figure 82 : Voile contact - Parachute STRATOFLYER
- Figure 83 : Schéma d'un parachute dorsal E ouverture automatique
- Figure 84 : Calques de radiographies de parachutistes en position
a) d'ouverture
b) d'atterrissage
avec visualisation des vecteurs d'après R.P. DELAHAYE et M.J. TEYSSANDIER
- Figure 85 : Redressement de la courbure lombaire dans une flexion forcée du rachis en avant détermination du point de rupture au point-charnière d'après E. FORGUE (1903)
- Figure 86 : Parachutiste en chute libre stable
- Figure 87 : Parachute hémisphérique manoeuvrable E.F.A. 6520
- Figure 88 : Parachute OLYMPIC 657-11
- Figure 89 : Parachute type "aile" STRATO-CLOUD
- Figure 90 : Parachute type "aile" STRATO-ELYER
- Figure 91 : Possibilités et performances d'un parachute type "aile"
- Figure 92 : Vol relatif : formation d'une étoile à six
- Figure 93 : Etoile à six
- Figure 94 : Précision d'atterrissage - Cible aménagée pour la précision d'atterrissage - un parachute de type OLYMPIC est en approche
- Figure 95 : Précision à l'atterrissage - Voilure de type OLYMPIC
- Figure 96 : Précision à l'atterrissage - Arrivée court avec projection de tout le corps en avant
- Figure 97 : Vol libre - Départ en Deltaplane
- Figure 98 : Accident de pompage
Variation du facteur de charge.
- Figure 99 : Accident de pompage
1 - Influence des accélérations sur la position du pilote
2 - Variation du facteur de charge
3 - Action sur le rachis dorsal
4 - Action sur le rachis lombaire
- Figure 100 : Centrifugeuse
Laboratoire de Médecine Aérospatiale - C.E.V. 91220 - BRETIGNY-AIR

- Figure 101: Pilote assis sur siège Martin-Baker AM 4 installé dans la nacelle de la centrifugeuse du C.F.V. de BRETIGNY.
- Figure 102 : Le mur postérieur doit être vérifié par une analyse des parties postérieures qui forment une ligne continue et régulière d'après R.P. DELAHAYE et Coll (294)
- Figure 103 : La fracture intéresse le mur de résistance vertébrale et entraîne un écartement des pédicules d'après R.P. DELAHAYE et Coll (294)
- Figure 104 : Recherche de la distance interpédiculaire : quand elle est augmentée, il faut craindre l'existence d'une fracture instable -d'après R.P. DELAHAYE et Coll (294)
- Figure 105 : Atteinte du mur de résistance vertébrale (Bombement) d'après R.P. DELAHAYE et Coll (294)
- Figure 106 : Classification anatomopathologique - d'après DECOULX et RIEUNAU modifiée (279)
- Figure 107 : Entorse et arrachement des ligaments interépineux et apophysaires dans les traumatismes de la colonne vertébrale -d'après WATSON-JONES (448)
- Figure 108 : Fracture D 11 caractérisée par un tassement cunéiforme (Ejection - lésion apparue à l'atterrissage)
- Figure 109 : fracture D10 (coin antérieur qui bave) - Ejection
- Figure 110 : Tassement de L5 localisé au plateau vertébral supérieur (accident d'autorotation - hélicoptère)
- Figure 111 : Même pilote (fig. 110) - Arrachement du coin antérieur de L5
- Figure 112 : Fracture de D8 et de D9 (parachutisme) avec aspect condensé
- Figure 113 : Accident de pompage - Fractures de D7 et de D8 - atteinte du plateau vertébral inférieur de D7 et du plateau vertébral supérieur D8
- Figure 114 : Fracture de L1 avec effraction du plateau vertébral supérieur (encoche nette) Aspect 6 semaines après le traumatisme (Ejection)
- Figure 115 : Fracture sagittale du L3 - Parachutiste ayant atterri en forêt
- Figure 116 : Fracture de L1 avec éjection du coin antérieur. Pincement de l'interligne D1 - L1 et rupture du mur postérieur et du mur de résistance (parachutisme)
- Figure 117 : Fracture-luxation de L1 avec paraplégie (parachutisme)
- Figure 118 : Tomographie chez un pilote éjecté : atterrissage nocturne en montagne. Fracture L1 avec atteinte du mur de résistance et du mur postérieur
- Figures 119 et 120 : Vol à voile - décrochage à basse altitude et fracture complexe L4 et L5 avec atteinte neurologique (syndrome de la queue de cheval) et lésions traumatiques (perforation de la vessie et fractures du bassin)
- Figure 121 : Hématome visible de face en regard de l'interligne D8-D9
- Figure 122 : Fracture de D9 (même blessé que fig. 121) - Accident de parachutisme
- Figure 123 : Fracture du pédicule gauche de L1 (Crash)
- Figure 124 : Même pilote que fig. 123 : Fracture du corps L1
- Figure 125 : Fracture des apophyses transverses gauches de L2-L2-L3 (Crash - monomoteur de tourisme)
- Figure 126 : Fracture des apophyses transverses droites de L1-L2 (atterrissage difficile après éjection)
- Figure 127 : Statistique de 806 cas de fractures de la colonne vertébrale (hopitaux D. Larrey à Versailles Percy à Clamart et Bégin à Saint-Mandé)
- Figure 128 : Déformation cunéiforme de D7 (aspect non traumatique)
- Figure 129 : Déformations cunéiformes de D2 et L1
- Figure 130 : Diagnostic des coins antérieurs (d'après DECOULX)
- Figure 131 : Hernie rétromarginale antérieure et fractures multiples récentes.
- Figure 132 : Coin antérieur de L4
- Figure 133 : Coin antérieur de L4.

- Figure 169 : Modèle analogique de l'homme debout ou assis soumis à des vibrations $G_z + F_0 =$ fréquence propre d'après COERMANN (38) (39)
- Figure 170 : Hélicoptère en vol stationnaire
- Figure 171 : Pas de la pale, axe du rotor et plan de rotation d'après J. RICHARD
- Figure 172 : Rotor en vol stationnaire d'après J. RICHARD
- Figure 173 : Rotor en vol stationnaire - résultante aérodynamique - d'après J. RICHARD
- Figure 174 : Variation du coefficient de portance avec l'incidence de la pale - d'après J. RICHARD
- Figure 175 : Rotor en vol stationnaire : Répartition des portances - d'après J. RICHARD
- Figure 176 : Vol de translation de l'hélicoptère d'après J. RICHARD
- Figure 177 : Articulation de battement d'après J. RICHARD
- Figure 178 : Le battement de la pale montante (à droite) diminue l'incidence d'après J. RICHARD
- Figure 179 : Axes de rotation de l'hélicoptère d'après J. RICHARD
- Figure 180 : Conicité moyenne, pales avançante et reculante d'après J. RICHARD
- Figure 181 : Comparaison de la transmissibilité des vibrations sur le corps humain et sur un mannequin anthropomorphique, en Abscisse : fréquence en Herz. En Ordonnée : rapport d'accélération thorax-bassin - d'après J.L. POIRIER (184)
- Figure 182 : Comparaison de la transmissibilité des vibrations sur le corps humain et sur mannequin anthropomorphique
En abscisse : fréquence en Herz
En Ordonnée : rapport d'accélération tête-thorax d'après J. L. POIRIER (184)
- Figure 183 : Transmissibilité des vibrations à travers le corps humain d'après J.L. POIRIER (184)
En abscisse : Fréquence en Herz
En Ordonnée : rapport d'accélération thorax-bassin
- Figure 184 : Transmissibilité des vibrations à travers deux coussins de siège du PUMA SA 330 d'après J.L. POIRIER
En Abscisse : fréquence en Herz
En Ordonnée : rapport d'accélération bassin-plancher
- Figure 185 : Siège de pilote de PUMA SA 330
- Figure 186 : Siège A.D.O.M.
- Figure 187 : Position de 2 pilotes de morphologie différente sur le siège pilote du PUMA SA 330
En haut : pilote de taille 1,62 m position des pieds défectueuse
En bas : pilote de taille 1,88 m position penchée
En avant : très bonne position des pieds
- Figure 188 : Position de deux pilotes de morphologie différente sur le siège pilote de la Gazelle
Excellente position des deux pilotes de taille différente
- Figure 189 : Position de 2 pilotes de morphologie différente sur le siège pilote du Dauphin
- Figure 190 : Siège pilote du Dauphin
- Figure 191 : Siège pilote de la Gazelle
- Figure 192 : Etude de la mobilité du rachis cervical d'après HAMBURGER et PUISTER
- Figure 193 : Attitude scoliotique lombaire par déséquilibre pelvien - Absence de rotation des corps vertébraux réductibilité par talonnette ou décubitus
- Figure 194 : Mesure de l'angle scoliotique (d'après COBB) V.N. Vertèbre neutre - V.S. Vertèbre sommet
- Figure 195 : Mesure de la lordose cervicale (d'après ARLFT) $\frac{C}{F}$
- Figure 196 : Mesure de la cyphose dorsale
- Figure 197 : ANGLE SACRO-VERTEBRAL et FLECHE de LORDOSE
- Figure 198 : Inclinaison sur l'horizontale du plateau sacré et indice de renversement
- Figure 199 : Bloc D 10 - D 11, séquellaire d'une maladie de SCHEUERMANN

Figure 200 : a) anomalie transitionnelle lombosacrée avec vertèbre ambiguë dont la transverse droite est hypertrophiée et réarticulée sans désencastrement de la vertèbre charnière
b) Désencastrement marqué de la vertèbre charnière au-dessus de la ligne des crêtes iliaques

Figure 201 : Lyse isthmique
a) Profil b) de face c) 3/4

Figure 202 : Spondylolisthesis de L5 sur S1

BIBLIOGRAPHIE

Les références bibliographiques sont groupées en deux rubriques. La première intègre les travaux de médecine aéronautique. La deuxième comprend les publications de pathologie rachidienne.

I. MÉDECINE AÉRONAUTIQUE

1. Achiary A., Terneau J., Fuchet R. : Traumatismes vertébraux du personnel navigant. Rev. Méd. Aéron. 1952, 7 (n°4), 371-376.
2. Achiary A., Servanty L., Cabanon A., André V. : La dynamique du siège éjectable. Rev. Méd. Aéron. 1956, 11 (n°1), 55-58.
3. A. Harrah R.C., Siewert R.F. : Pilot induced instability. "Meeting Stability and Control". Cambridge Angleterre. A.G.A.R.D. 1966, CP 17, part 2, 705-727.
4. André V.E. : La pathologie du parachutisme. Thèse Médecine Paris 1948, 81 pages.
5. Auffret R. : Ejection à travers verrière. Mémoire original pour la candidature Prix Air France organisé par la Société Française de Physiologie et de Médecine aéronautique et cosmonautique 1965, 1 vol., 36 pages in 4°.
6. Auffret R., Sérís H., Demange J., Delahaye R.P. : Accélération à l'éjection. Moyens d'étude. Effets physiologiques. Tolérance. "Linear Accidents of Impact Type". A.G.A.R.D. 1971, CP 88, A 3-1, A 3-6.
7. Auffret R., Delahaye R.P., Metzges P.J. : Mécanisme physiopathogénique des lésions rachidiennes des pilotes d'avions de combat après éjection. 21^e Congrès Intern. Méd. aéron. spat. Munich, 17-21 sept. 1973, Vol. rapports 207-208.
8. Auffret R., Delahaye R.P., Salvagniac J. : Phénomènes vibratoires rapides en vol et fractures du rachis. "Vibrations and Combined Stresses in Advanced Systems". A.G.A.R.D. 1974, CP 145, B 13-1 à B 13-5.
9. Auffret R., Delahaye R.P. : Lésions vertébrales après éjection. Rapport de synthèse du Working Group : "Spinal Injury after Ejection - Diagnosis and follow up". Rapport consultatif A.G.A.R.D. 1975 - 72, 60 pages (en français et en anglais).
10. Auffret R., Gignoux Ch., Delahaye R.P. : Incidences médico-légales des fractures du rachis après éjection. Rev. Méd. aéron. spat. 1976, 13 (n° 58), 85-88.
11. Barcikowski W., Czerski P. : Radioisotopic and morphologic investigations on the influence of Gz + accelerations of various magnitude and short duration on the vertebral column of rats. Communication au XVI^e Congrès de Médecine aéronautique et spatiale Lisbonne, 11-15 septembre 1967.
12. Barrie H.J., Hodson-Walker N. : Incidence and Pathogenesis of fractures of the lumbar transverse Process in Air crashes. Aerospace Med. 1970, 41, 805-808.
13. Barwood A.J. : The maintenance of correct ejection posture. Aerospace Med 1965, 36, 618-621.
14. Beck A. Von : Radiologische Beurteilung der Wirbelsäule aus fliegerärztlicher Sicht. Wehrmed Mschr 1973, 17, 267-276.
15. Beck A. Von, Killus J. : Mathematisch statische Methoden der Wirbelsäulen Beurteilung und ihre Bedeutung für die Flugmedizin. 21^e Congrès Intern. Méd. aéron. spat. Munich 17-21 sept 1973, p. 316-318.
16. Beck A. Von : Proposal for improving Ejection Seats with respect to sitting comfort and Ejection posture. Aviat. Space, Environ. Med. 1975, 46, 736-739.
17. Beck A. Von : Haltungsschäden und Wehrflieger Verwendungsfähigkeit in "Die Wirbelsäule in der Flugmedizin" 1976, p. 54-61, Hippokrates Verlag Stuttgart.
18. Beck A. Von : Wirbelsäule und Flugmedizin Einführung in die Thematik in "Die Wirbelsäule der Flugmedizin" 1976, p. 9-18, Hippokrates Verlag Stuttgart.
19. Beck A. Von, Fischer W. : Wirbelsäulen-entanz-aufnahmen zur Beurteilung der Wehrfliegerverwendungsfähigkeit (clichés radiologiques de tout le rachis pour évaluer l'aptitude à voler des pilotes militaires). Wehrmed. Mschr 1978, 22, 329-332.
20. Beck A. Von : Spätreaktionen der Wirbelsäule bei Flugzeugbesatzungen. Wehrmed. Mschr 1980 (à paraître).
21. Bell H.S., Shunn S.P. : Summary and evaluation of air craft accidents and fatalities. Aerospace Med. 1964, 35, 553-559.
22. Belly J. : Les sièges éjectables. Mémoire spécialisation Parachutiste d'Essais. Centre d'Essais en vol de Brétigny 1960, 1 vol. in 4°, 160 pages.
23. Benitte A.C. : La pathologie du parachutiste. Concours Méd. 1965, 87, 1809-1816.

24. Berthoz A. : Etude biomécanique des vibrations de basse fréquence subies par l'homme. Thèse Doct. Ingénieur. Fac. Sciences Paris 1966.
25. Berthoz A. : Protection de l'homme contre les vibrations. Laboratoire de Physiologie du travail du Centre National Arts et Métiers Paris 1969, 160 pages in 4°.
26. Berthoz A. : Le corps humain et les vibrations. La Recherche 1971, 2, 121-129.
27. Bezrek A.A. : Helicopter Versus Fixed Wing Crash Injuries. Aerospace Med. 1963, 34, (cité d'après L. Sand) (202).
28. Botenga S.P., Hamburger R.G., Fuister G.J. : Lésions de la colonne vertébrale et cervicale dans les vols en avions à réacteurs. 5^e Congrès Européen de Méd. Aéron. Londres 30 août-2 sept. 1960 (résumé in Presse Méd.) 1961, 69, 201.
29. Boucis D., Daskalopoulos G. : Accidents of parachutists. Hell. Arm. Forces Med. Rev. 1978, 12, 413-416 (en grec).
30. Brauholer W.M. : Effects of Vibrations on the Musculoskeletal systems. Vibration and Combined Stresses in Advanced Systems. A.G.A.R.D. 1974 - CP 145 - B 14-1 à B 14-4.
31. Chabert M. : Les accidents de parachutisme chez les jeunes. Rev. Med. Lyon 1960, 2, 175-179.
32. Chiris P., Jouffroy R., Sérès H., Auffret R., Delahaye R.P. : De l'intérêt de l'emploi de la radiologie dans les enquêtes après accident aérien (à propos d'une éjection supersonique mortelle). Rev. Méd. aéron. spat. 1969, 8, 179-183.
33. Chubb R.M., Davidson W.H., Cable W.D. : The pathology of ejection failure. Aerospace Med. 1963, 34, 1050-1051.
34. Chubb R.M., Lentz E.C., Shannon R.H. : Correlation of parachute landing injured and surface wind velocity. Aerospace Med. 1964, 35, 962-965.
35. Chubb R.M., Detrick W.R., Shannon R.H. : Compression fracture of the spine during U.S.A.F. ejections. Aerospace Med. 1965, 36, 968-972.
36. Cilla F., Italiano P. : Lesioni traumatiche vertebrale da incidenti di volo. Rev. Med. Aeron. Spaz 1959, 22, 169-179.
37. Clarke N.P. : Biodynamic response to supersonic ejection. Aerospace Med. 1963, 34, 1089-1094.
38. Coermann R.R. : Investigations into the effect of vibration on the human body. Luftfahr Mediz 1940, 4, 73-117 (traduit par Royal Aircraft Establishment W. Shirley - Farnborough Library Translation 1947, n° 217).
39. Coermann R.R. : The mechanical impedance of the human body in sitting and standing position at low frequencies. Human Factors 1962, 4, 227-253.
40. Colleau C. : Colonne vertébrale et pilotage des hélicoptères. Thèse Méd. Lyon, 102 pages in 4°.
41. Collins T.A., Sawyer C.H., Ferrari V.J.J., Shannon R.H. : Five years injury experience in espace from U.S.A.F. ejection seat equipped aircraft. Aerospace Med. 1968, 39, 627-630.
42. Cooper K.H., Holstrom F.G.M. : Injuries during ejection seat training. Aerospace Med. 1963, 34, 139-141.
43. Crance J., Dollander G., Boulange M. : Les accidents de planeur en France dans les dix dernières années. Méd. aéron. spat. 1979, 18 (n° 70), 109-113.
44. Crooks L.M. : Long term effects of ejecting from aircraft. Aerospace Med. 1970, 41, 803-804.
45. David J.W. : Aspects médicaux de l'éjection des pilotes d'avions de combat. Thèse Méd. Lyon, 120 pages in 4°.
46. Davidson A.F. : The principles of under water ~~Escape~~ from Aircraft. AGARDOGRAPH 230, 1977
47. Delahaye R.P., Buchet R., Mangin H. : Les lésions traumatiques du rachis chez le personnel navigant. Entretiens Bichat 1964, Vol. Chir. Spec., 363-366.
48. Delahaye R.P., Mangin H., Sérès H., Auffret R. : Intérêt d'un examen radiologique de départage chez les pilotes d'avions à réaction. Rev. Méd. aéron. spat. 1964, 3 (12), 49-52.
49. Delahaye R.P., Sérès H., Mangin H., Auffret R. : Etude physiopathologique des fractures du rachis de l'éjection. Rev. Méd. aéron. spat. 1964, 3 (12), 39-48.
50. Delahaye R.P., Fabre J., Mangin H., Galban P. : Etude de la statistique des éjections observées dans l'armée française. Rev. Méd. aéron. spat. 1964, 3 (12), 27-37.
51. Delahaye R.P., Mangin H., Sérès H., Shickele J. : Les aspects radiologiques des lésions vertébrales du pilote éjecté. J. Radiol. Electrol. 1965, 46, 427-436.

52. Delahaye R.P., Pannier R., Séris H., Carre R., Auffret R., Mangin H., Teyssandier M.J. : Physiologie et pathologie des affections du rachis en médecine aéronautique. Table ronde et rapport du 16^e Congrès de Médecine aéronautique et spatiale, Lisbonne, 11-15 septembre 1967, 1 vol. in 4^e Laboratoires Geigy 1969, 160 pages.
Edition anglaise par l'A.G.A.R.D. sous le titre "Physiopathology and Pathology of affections of the spine aerospace medicine", 1 vol., AGARDOGRAPH n° 140, 80 pages.
53. Delahaye R.P., Séris H., Auffret R. : Radiographies de la colonne vertébrale sur des pilotes en position d'éjection. Rapport Lamas/C.E.V. 48011 - 21.03.67 - extraits dans Rev. Méd. aéron. spat. 1967, 6(22)11-12.
54. Delahaye R.P., Gueffier G. : La radiographie dynamique du rachis cervical. Intérêt général de la Méthode en Médecine aéronautique. 18^e Congrès Intern. Méd. aéron. spat. Oslo, 4-8 août 1968, in "Aviation and Space Medicine". Editors B. Hannisdahl et C.W. Swen-Jacobsen 1969, p.126-132.
55. Delahaye R.P., Gueffier G. : Les résultats de l'exploration radiodynamique du rachis cervical des pilotes militaires d'avions à réaction. 18^e Congrès Intern. Méd. aéron. spat. Oslo, 4-8 août 1968, in "Aviation and Space Medicine". Editors B. Hannisdahl et C.W. Swen-Jacobsen 1969, 133-139.
56. Delahaye R.P., Salvagniac J., Mangin H., Metges P.J. : Examen radiologique systématique du rachis. Difficultés actuelles dans la détermination de la normalité. Rev. Méd. aéron. spat. 1969, 8, 115-119.
57. Delahaye R.P., Séris H., Auffret R., Gueffier G. : La radiographie en position assise. Intérêt en médecine aéronautique. Revue des Corps de Santé 1969, 10 (5), 571-574.
58. Delahaye R.P., Mangin H., Gueffier G., Combes A., Cren M., Metges P.J. : L'examen radiologique systématique du rachis dans le cadre de la visite d'admission au personnel navigant. Définition d'une normalité et conduite à tenir en présence des anomalies congénitales. Rev. Corps Santé 1970, 11, 667-683.
59. Delahaye R.P., Séris H., Auffret R., Gueffier G., Metges P.J. : Etude radiologique des lésions du rachis chez les pilotes ayant subi une éjection. "Linear Acceleration of Impact Type" A.G.A.R.D. 1971, CP 88, A 5-1 à A 5-8.
60. Delahaye R.P., Gueffier G., Metges P.J. : Etude radiologique systématique du rachis et aptitude à l'emploi de pilote de combat. "Improved and Simplified Methods for the Clinical Evaluation of Air Crew". A.G.A.R.D. 1971, CP 95, B 10-1 à B.10-9.
61. Delahaye R.P., Séris H., Auffret R., Jolly R., Gueffier G., Metges P.J. : L'examen radiologique du rachis et l'aptitude à l'emploi de pilote d'hélicoptère. Rev. Méd. aéron. spat. 1971, 10 (38) 94-102.
62. Delahaye R.P., Mangin H., Boursiquot P., Gueffier G., Cren M., Laurent H. : Les anomalies congénitales du rachis de l'adulte jeune. Etude statistique et radiologique. Leur rapport avec l'aviation de haute performance. Colloque international des Malformations Congénitales du névraxe et du rachis, 5-6 mars 1965, 1 vol. 1971, Editions S.E.P.I., p. 201-281.
63. Delahaye R.P. : The importance of the spine in the determination of flying fitness. 21^e Congrès Intern. Méd. aéron. spat. Munich, 17-21 sept. 1973, vol. rapport, 311-314.
64. Delahaye R.P., Auffret R., Tournier M. : Etude de la position sur siège éjectable Martin-Baker. Rapport de Recherches. Centre d'Essais en Vol de Brétigny, 29 déc. 1972, n° 75 C.E.V./Lamas.
65. Delahaye R.P., Metges P.J., Léger A. : Les lésions traumatiques des membres inférieurs chez les parachutistes. Rev. int. Ser. Santé 1973, 46, (12) 819-830.
66. Delahaye R.P., Gueffier G., Metges P.J. : Surveillance du rachis des pilotes ayant subi une éjection. 20^e Congrès Inter. Méd. aéron. spat. Nice, 18-21 sept 1972, Rev. Méd. aéron. spat. 1973, 12 (45) 67-68.
67. Delahaye R.P., Auffret R., Pesquies P., Gueffier G. : Lésions observées après éjection des pilotes d'avion à réaction. Méd. Légale et Dommage Corporel 1973, 6, 18-36.
68. Delahaye R.P., Metges P.J., Léger A. : Les impacts en chute libre. Méd. et Armées 1974, 2, (1)23-28.
69. Delahaye R.P., Auffret R., Metges P.J. : les fractures du rachis survenant au cours des éjections des pilotes d'avions de combat. Méd. et Armées 1974, 2 (3) 199-204.
70. Delahaye R.P., Auffret R., Demange P., Metges P.J. : Ejection des pilotes d'avions de combat. Cours Ecole d'Application du Service de Santé pour l'Armée de l'Air. 1 vol. Paris 1975, 133 pages in 4^e.
71. Delahaye R.P., Auffret R., Metges P.J., Léger A. : Le parachutisme. Cours Ecole d'Application du Service de Santé pour l'Armée de l'Air. 1 vol. Paris 1975, 70 pages in 4^e - 1 vol. 71 illustrations, 34 pages (commun avec cours sur l'Ejection).

72. Delahaye R.P., Bocquet H., Auffret R., Metges P.J., Gimbergues H., Chantome M. : Fractures multiples du rachis dorsal après crash (à propos d'un cas récent avec aspects radiologiques exceptionnels). Rev. Méd. aéron. spat. 1975, 14 (53) 31-34.
73. Delahaye R.P., Auffret R., Demange P., Metges P.J., David J.N. : L'éjection des pilotes d'avions de combat (6 articles). Rev. int. Serv. Santé 1975, 48, (n° 6) 433-444 (n°7-8) 535-548, (n° 9-10) 601-609, (n° 11) 707-717, (n° 12) 769-775, 49 (n°3) 213-220.
74. Delahaye R.P., Auffret R., Metges P.J., Salvagniac A. : Traumatologie en vol des pilotes d'avions de combat (temps de paix). Rev. Méd. Sport 1977, 51, (2) 65-71.
75. Delahaye R.P., Auffret R., Metges P.J., Poirier J.L., Vicens L. : Les algies vertébrales des pilotes d'hélicoptères. Méd. et Armées 1978, 6, (10) 871-879.
76. Delahaye R.P., Auffret R., Metges P.J., Kleitz C. : La radiologie du rachis dans la visite d'admission du personnel navigant militaire. Rapport de Recherches. Centre d'Essais en Vol Brétigny, mai 1979, n° 1080.
77. Delahaye R.P., Auffret R., Metges P.J., Poirier J.L., Vicens L. : physiopathologie des algies vertébrales du pilote d'hélicoptère. Méd. aéron. spat. 1979, 18, (70) 142-145.
78. Delahaye R.P. : Lésions observées chez les pilotes d'avions de combat après éjection. Le Médecin de Réserve 1979, 75, (3) 5-10.
79. Dieckmann D. : A Study of the influence of vibration on man. Ergonomics 1958, 1, 247-255.
80. Drew M.D., Mac Clelland R.R., Fischer R.P. : The dominance of vertebral column fractures associated with neurologic deficits among survivors of light plane accidents. J. Trauma 1977, 17, (8) 574-578.
81. Dupuis H. : Belastung und Beanspruchung der Wirbelsäule durch Vibration in "Die Wirbelsäule in der Flugmedizin" 1976. Hippokrates Verlag Stuttgart p. 48-53.
82. Evrard E. : Etude comparative des réglementations sur l'aptitude médicale aux emplois du personnel navigant dans 9 aviations militaires de 7 pays de l'O.T.A.N. AGARDOGRAPH 1977, AG 213.
83. Evrard E. : Précis de Médecine aéronautique et spatiale. Livre Maloine S.A. Editeurs Paris, 706 pages.
84. Ewing C.L., Thomas D.J. : Human Dynamic Response to - G_x impact Acceleration "Linear Accidents of Impact Type". A.G.A.R.D. 1971, CP 88, page 11-1 à 11-12.
85. Ewing C.L. : Vertebral Fracture in jet Aircraft Accidents. A Statistical Analysis for the period 1959-1969, U.S. Navy. Aerospace Med. 1966, 37, 505-508.
86. Ewing C.L., Thomas D.J. : Torque versus Angular Displacement Response of Human Head to - G_x Impact Acceleration. 17th Staff Car Crash Conference 1974, 309-342. Society of Automotive Engineers New York.
87. Ewing C.L., Thomas D.J. : Bioengineering Aspects of Spinal Injury in the O.V.1 (Hokawak) Aircraft. "Escape Problems and Manoeuvres in Combat Aircraft". A.G.A.R.D. 1973, CP 134, p. A 2-1 à A 2-9.
88. Fabre J., Graber R. : Aspects médicaux du vol en hélicoptère dans les Forces aériennes françaises-Pilotage - Traumatologie. Rev. Méd. aéron. 1959, 14, 353-376.
89. Fabre J. : La traumatologie vertébrale observée en médecine aéronautique. Rev. Méd. aéron. 1962, 1, (3) 63-69.
90. Fabre J. : Physiopathologie du parachutisme et des éjections. Rev. Prat. (Paris) 1963, 13, (17) 2105-2116.
91. Fabre J., Houdas Y. : Détermination physiologique des facteurs responsables de lésions graves lors des éjections supersoniques. Rev. Méd. aéro. 1961, 1, (1) 190-192.
92. Fabre J., Pfister A. : Aspects médicaux des éjections à très basse altitude. Rev. Méd. aéro. 1969, 2 (7) 249-251.
93. Fabre J., Balabaud J. : Aspect médical des éjections sur Mirage III. Rev. Méd. aéron. spat. 1964, 3 (10) 565-569.
94. Fabre J. : Etude physiologique d'une éjection sonique ayant entraîné des lésions graves. Rapport C.R.M.A./Recherches 20.12.1966, n° 177.
95. Fischer V., Witzelberger O. : Wirbel Säulenbeschwerden Bei Hubschrauber besatzungen. Wahrn Nachr 1979, 240-243.
96. Fitzgerald J.G., Crotty J. : The incidence of backache among Aircrew and Groundcrew in the Royal Air Force. Flying Personnel Research Committee, 13/3 de février 1977.

97. Fitzgerald J.G. : An approach to the Problem of Backache in Aircrew. Flying Personnel Research Committee, fasc. 1280, sept. 1968.
98. Garrigues A. : Les lésions traumatiques chez les parachutistes. Thèse Médecine Toulouse 1952.
99. Gautrelet M. : Traumatismes accidentels par parachutage. Méd. Aéron. 1946, 1, 461-463.
100. Geelen C. : Ruggegraatlletsels Bij Gebruik van de Schietstoel (Lésions à la colonne vertébrale suite à l'emploi du siège éjectable). Acta Belgia - Arte Med. pharm. milit. 1979, 131 (n°4) 5-8.
101. Gérard G.F. : Le parachutisme. Pathogénie de ses accidents. Essai de prophylaxie. Thèse Méd. Paris 1956, 120 pages.
102. Geschwend N., Loder E. : Wirbelsäule und Militärflugdienst. Vierteljahrsschweiz Sanitätssoffiz 1962, 28-40.
103. Gierke H.E. Von, Clarke N.P. : Effects of vibration and in buffeting on man in "Aerospace Medicine" 1971. H.W. Randel (Ed.) 2° éd. Williams and Wilkins Co, p. 208.
104. Gierke H.E. Von : Vibrations and noise problems expected in manned space craft. Noise control 1969, 5, 144-152.
105. Gierke H.E. Von : Biodynamic effects on low altitude flight control problems. A.M.R.L. TR 1970, 70 - 67.
106. Gillies J.A. : A text Book of Aviation Physiology, 1 vol. Pergamon Press 1965, 1026 pages.
107. Golden C. : Spinal Injury resulting from Ejection from Royal Naval Aircraft 1960-1968, A.G.A.R.D. 1969, n° 61.
108. Goldman D.E. : A review of subjective responses to vibratory motion of the human body (1-70 cps). Nav. Med. Res. Inst. Proj. NM 04401 - 1948.
109. Goldman D.E., Gierke H.E. : Effects of shock and vibration on man. Shock and vibration Hand Book, tome III, Mac Graw Hill 1961.
110. Goulevitch épouse Moniez E.M. : Aspects médico-physiologiques du saut en parachute (1ère partie). Thèse Médecine Université Claude Bernard Lyon 1978, 1 vol. in 4°, 114 pages.
111. Grandpierre R., Violette F., Fabre J. : Recherche médicale et abandon de bord des avions modernes. Forces aériennes françaises 1961, n° 171, 845-876.
112. Grandpierre R., Violette F., Fabre J. Marchesseau, Ginet, Cholin : Etude des fractures vertébrales lors d'atterrissages forcés ou défectueux. Rev. Méd. aéron. spat. 1963, 2, (?) 525-536.
113. Griffin R.C. : Spinal Ejection injuries. Proceed Roy Soc. Médic. Nov 1975, 68, 702-705.
114. Gubser A. : Wirbelsäulen : Entstehung-Erkennung Beurteilung, in "Die Wirbelsäule in der Flugmedizin". 1 vol. 1976. Ed. Hippokrates Verlag Stuttgart, p. 19-23.
115. Gueffier G. : La radiologie dynamique du rachis cervical (étude de 377 dossiers). Intérêt de la méthode en pathologie. Application à la Médecine aéronautique. Mémoire pour le Certificat d'Etudes Spéciales de Radiologie 1967, 93 pages, 22 fig.
116. Gueffier G., Delahaye R.P. : La panoradiographie dans l'expertise médicale du P.N. Rev. Méd. aéron. spat. 1973, 12 (48) 570-572.
117. Guibal S., Broussolle J. : Etude des vibrations transmises aux équipages d'hélicoptères. Rev. Corps Santé 1965, 6, (1) 51-62.
118. Guidizzi A. : Le lezioni da lancio con paracadute fra il personale in addestramento della Scuola paracadutisti di Tarquina (1940-1943). Riv. Méd. Aéron. spaz. 1950, 13, (n°4) 625-654.
119. Guignard J.C. : Vibrations in "Textbook of Aviation Physiology" Gillies J.A. 1965, Pergamon Press, Ch. 29, p. 819-894.
119. Guignard J.C., Guignard E. : Human response to vibration. A critical survey of published bis work. Institute of Sound and Vibration Research. University of Southampton (U.K.) 1970. Mémoire n° 375, 293 pages.
120. Guignard J.C., King P.R. : Aeromedical Aspects of Vibration and Noise. AGARDOGRAPH 1972, AG 151

121. Gurniak W., Neiss A. : Post mortem Röntgenbefunde bei Wirbelsäulen nach Flugunfall. 21^e Congrès Intern. Méd. aéro. spat. Munich, 17-21 sept. 1973, p. 309-310.
122. Haack M. : Human tolerances to vibrations in farm machines. Agricultural Engineering avril 1956.
123. Haan P. : Médecine et parachutisme militaire. Thèse médecine Lyon 1945.
124. Habroushe M.P. : The spinal column in aviators of high performance aircraft. Rev. int. Serv. Santé 1979, 52 (3) 231-238.
125. Haley J.L. : Analysis of U.S. Army Helicopter Accidents to Define Impact Injury Problems. "Linear Accidents of Impact Type". A.G.A.R.D. 1971, CP 88-71, page 9-1 à 9-12.
126. Hamburger R.J., Puister G.J. : Onderzoek naar wervelkolombeschadiging bij Jachtvliegers van de Koninklijke Luchtmacht (Etude des lésions de la colonne vertébrale cervicale chez les pilotes de chasse de la Force Aérienne Royale néerlandaise). Aeromedica Acta 1959-1960, 105-104.
127. Harrison W.D. : Aircrew experiences in U.S.A.F. ejections 1971-1977. J.A.M.E. Journal 1979, 2 (3) 10-13.
128. Henzel S.H., Mohr G.C., Gierke H.E. Von : Reappraisal of Biodynamic Implication of Human ejection. Aerospace Med. 1968, 39, (3), 231-240.
129. Hicks J.W. : Engineering analysis of crash injury in army aircraft. "Operational Helicopter Aviation Medicine". A.G.A.R.D. 1978, CP 255, p. 55-1 à 55-11.
130. Hirsch C., Nachemson A. : Clinical observations on the Spine in Ejected Pilot. Aerospace med. 1965, 34, 629-632.
131. Hornick R.J. : Vibration in "Bioastronautics Data Book"- Second Edition - N.A.S.A., SP 3006, 1973, ch. 7, 297-348.
132. Huelke D.F., Kaufer H. : Vertebral column injuries and seat belts. J. Trauma 1975, 15, 304-318.
133. Huelke D.F., Snyder R.G. : Seat belt injuries. The need for accuracy in reporting of cases. J. Trauma 1975, 15, 20-23.
134. Italiano P. : Interpretazione sul meccanismo di frattura in piloti di sanigetti ejattati con il seggiolino con particolare riguardo agli F 104 C. Riv. Med. aeron. spaz 1966, 29, 193-227.
135. Italiano P. : Evoluzione delle fracture vertebrali da ezejione e considerazioni medicolegali. Riv. Med. aeron. spaz 1967, 30, 307-323.
136. Italiano P. : Contributo sulle lesioni traumatiche de ezejione a quota zero. Riv. Med. aeron. spaz 1967, 30, 437-454.
137. Italiano P. : La fretture vertebrali dei piloti neigli incidenti da Elicottero (Les fractures vertébrales chez les pilotes dans les accidents d'hélicoptère - Traduction C.E.R.K.A.). Riv. Med. aeron. spaz. 1966, 29, 577-602.
138. Jex H.R. : Summary of T. 38 A Pio Analyses. Systems Technology INC - TR 259-1, janv. 1963.
139. Joensen H.D., Joensen H.D. : Aircraft accidento in the Faroe Islands in 1970 : observations from a medical point of view, with special reference to spinal fractures. Aerospace med. 1972, 43, 665-670
140. Johnson W., Mamalis A.G. : Crash worthiness of vehicles. Mechanical Engin Public London 1978, p. 74-101.
141. Jones W.L., Madden W.F., Luedemang W. : Ejection seat Accelerations and Injuries. Aerospace med. 1964, 35, 550-562.
142. Kaplan B.H. : Evaluation of the Grumman M K J 5 D. Ejection seat in Respect to Spinal Alignment. U.S.A.A.R.L. Lab. Report 7210, février 1972.
143. Kazarian L.E., Boyd D.D., Gierke H.E. Von : The Dynamic Biomechanical nature of Spinal fractures and articular facet derangement. "Linear Accidents of Impact Type". A.G.A.R.D. 1971, CP 88-71, page 19-1 à 19-2.
144. Kazarian L.E. : F/FB-111 Escape Injury Mechanism Assesment. A.M.R.L. oct. 1977, 77-60.
145. Kazarian L.E. : Standardization end Interpretation of Spinal Injury criteria. A.M.R.L. 1978, TR 78-85.
146. Kazarian L.E., Belk W.F. : Flight Physical Standards of the 1980's Spinal Column considerations. A.M.R.L., TR 79-74.

147. Keegan J.J. : Alterations of the lumbar related to posture and seating. J. bone Jt-Surg 1953, 35 A, 584-599.
148. Kiel F.W. : Survey of military sport parachuting. Aerospace med. 1965, 36, 360-362.
149. Kiel F.W. : Hazards of military parachuting. Milit. Med. 1965, 130, 512-521.
150. Kiel F.W. : Parachuting for sport. J.A.M.A. 1965, 194 (3), 150-154.
151. Kimball K.A., Harden D.F., Hofmann M.A. : Army Autorotational Accidents in "Espace Problems and Manoeuvres in Combat Aircraft". A.G.A.R.D. 1973, CP 134.
152. King A.I., Prasad P., Ewing C.L. : Mechanisms of Spinal Injury dueto Candocephalad acceleration. Orthop. Clin. North Amer. 1975, 6 (1), 19-31.
153. Kinneman E.E. Jr, Every H.G., Parker J.F. : Specific Biomedical Issues in the Escape Phase of Air Combat Mishaps during Southeast Asia operations in "Escape Problems and Manoeuvres in Combat Aircraft". A.G.A.R.D. 1973, CP 134, 11-1 à A1-7.
154. Krefft S. : Aircraft Accident injuries and Aircraft Accident Reconstruction in "Linear Acceleration of Impact Type". A.G.A.R.D. 1971- CP 88-71, A 3-1 à A3-11.
155. Kukla D. : Spätshäden der Wirbelsäule nach trauma in "Die Wirbelsäule in der Flugmedizin" 1 vol. 1976, Hippokrates Verlag Stuttgart, p. 36-39.
156. Lamasson F. : Définition et étude statistique de la fréquence des lésions ostéopathiques vertébrales dans le personnel navigant de l'Armée de l'Air. Rev. Corps Santé 1961, 2 (5) 607-648.
157. Latham G. A study in body ballistics seat ejection. Proceedings of the Royal Society 1957, 147, 121-139.
158. Laurell L., Nachenson A. : Some factors influencing spinal injuries in Seat ejected Pilots. Aerospace Med. 1963, 34 (8), 726-729.
159. Léger A.R.R. : Incidences traumatiques du saut en parachute (troupes aéroportées, parachutisme sportif, éjection des pilotes d'avions de combat). Thèse Médecine Univ. Cl. Bernard Lyon I 1972, 1 vol. 140 pages in 8°.
160. Léger A.R.R., Metzges P.J., Delahaye R.P. : Traumatologie du parachutisme. Rev. Méd. Sport 1977, 51 (2), 124-131.
161. Lentz P.M. : Survival following controlled Aircraft Crashes. Aerospace Med. 1964, 25 (1) 53-57.
162. Leroux R. : La fatigue opérationnelle des pilotes d'hélicoptère. Rev. Corps Santé 1960, 1 (4) 493-518.
163. Leroux R. : Pathologie de l'aviation légère de l'Armée de Terre. Traité d'ergonomie militaire appliquée à l'A.L.A.T. 1966, 1 vol. 51 pages.
164. Levy P.M. : Ejection Seat Design and Vertebral fractures. Aerospace Med. 1964, 25 (6), 545-550.
165. Liu Y.K., Pontius U.R., Hoseyr R. : The effects of initial Spinal Configuration on Pilot Ejection. U.S.A.A.R.L. Lab. Report 4, octobre 1973.
166. Mangin H. : La part de la radiologie dans l'étude des fractures du rachis après éjection des pilotes d'avions à réaction. Mémoire pour le Certificat d'Etudes Spéciales de Radiologie, Paris 1964, 130 pages in 4°.
167. Mason J.K. : Histopathological Responses to Deceleration in "Linear Accidents of Impact Type". A.G.A.R.D. 1971, CP 88-71, A 4-1 à A 4-6.
168. Mason J.K. : Fractures of the Spine in fatal Aircraft Accidents. 21^e Congrès Intern. Méd. aérospat. Munich 17-21 sept. 1973, p. 307-308.
169. Mattox K.L. : Injury experience in Army Helicopter Accidents. U.S. Army Board of Aviation. Accident Research Fort Rucker Alabama BR 68-1, cité d'après Cond (303).
170. Melzig H.P., Schmidt U. : Escape Measures for Combat Helicopter Crews in "Escape Problems and Manoeuvres in Combat Aircraft". A.G.A.R.D. 1974, CP 134, A 13-1 - A 13-11
171. Misonneard A.R., Terneau J. : Rapport sur la fatigue du pilote d'hélicoptère. Rapport Recherches C.E.R.M.A. 22.03.1957 - n° 445.
172. Mohr G.C., Brinkley J.W., Kazarian I.E., Millard : Variations of Spinal Alignment in Egress Systems and their effect. Aerospace Med. 1969, 40 (9), 983-988.
173. Monier J.L. : Aspects médico-physiologiques du saut en parachute (2^e partie). Thèse médecine Université Cl. Bernard Lyon, 26 oct 1978, 1 vol. in 4°, 124 pages

174. Montgard F., Sais J., Guiot A. : Les lombalgies des pilotes d'hélicoptères. Fréquence des déviations scoliotiques. Rev. Corps Santé 1963, 4, 30-32.
175. Montgard F., Sais J., Guiot A. : Considérations médico-cliniques sur les lombalgies des pilotes d'hélicoptère. Rev. Corps Santé 1963, 2, 859-860.
176. Munson H.G. : A study of U.S.A.F. survival accidents, 1 Janv. 1965, 31.12.1960. S.A.F.E. 1971, 2, (3) 15
177. Myers P.W. : Disc Disease in flying personnel. Aerospace med. 1964, 35 (1), 65-68.
178. Nogues C., Pingannaud H., Fabre J., Gibert A. : Analyse des facteurs physiopathologiques observés lors des éjections récentes. Rev. Méd. aéron. spat. 1966, 5 (17), 15-17.
179. Pariel J. : Exploration radiologique du rachis dans le cadre de la visite d'aptitude du personnel navigant de l'aéronautique (définition d'une normalité élargie et conduite à tenir en présence des anomalies congénitales). Mémoire pour le Certificat d'Etudes Supérieures de Radiologie Paris 1969, 66 pages in 4°.
180. Parsal J.P., Jacob G., Auffret R., Delahaye R.P., Salvagniac A. : Les fractures du rachis en vol. Rôle des accélérations + Gz. Rev. Méd. aéron. spat. 1975, 15, 55-56.
181. Pellet C. : Un aspect du mal des vibrations : la lombosciatique du pilote d'hélicoptère. Rev. Rhum. 1957, 24, 318-320.
182. Plantureux G., Auffret R., Lavernhe J. : Considérations médicales sur les accidents de l'aviation légère. Rev. N. Méd. aéron. spat. 1979, 18 (69) 40-44.
183. Pletcher K.E., Neely G.R. : U.S.A.F. Emergency Escape experience 1950-1959. Aerospace med. 1961, 32 (6), 524-528.
184. Poirier J.L. : Mesure des vibrations sur le siège pilote du SA 330 PUMA équipé de différents coussins. Rapport Centre d'Essais en vol. C.E.V./S.E./LAMAS n° 22, 1979.
185. Poirier J.L. : Transmissibilité des vibrations à travers différents sièges d'hélicoptère. Rev. Méd. aéron. spat. 1979, 18 (72), 262-268.
186. Poirier J.L. : Effets sur l'homme des vibrations de basse fréquence. Rapport Centre d'Essais en Vol C.E.V./LAMAS n° 1067, janvier 1978.
187. Porter S.D., Green E.W. : Seat belt injuries. Arch. Surg. 1968, 96, 246-256.
188. Rabischong, Sérès H., Planche, Bel Former, Micallef, Ferruchon, Danti, Gilbert, Vigier : Configuration des sièges pour aéronefs. Mémoire Contrat D.R.N.E. n° 72-759-00.
189. Rance B.H., Chappelow J.W. : Aircrew assessment of the Vibration Equipment in Helicopter. "Vibrations and Combined Stresses in Advanced Systems". A.G.A.R.D. 1974, CP 145, R1-1 à R1-6.
190. Ravalec J. : Le saut en parachute avec ouverture commandée et retardée. Les problèmes de collision en chute libre. Méd. et Armées 1977, 5, 443-458
191. Reader D.C. : Ejection Experience from V.T.O.L. Military Aircraft in "Escape Problems and Manoeuvres in Combat Aircraft". A.G.A.R.D. 1973, CP 134, A 7-1 A 7-2.
192. Richard J. : Les vibrations de l'hélicoptère. Méd. aéron. spat. 1979, 18 (70), 124-130.
193. Richaud, Baudrit, Teyssandier : Les accidents et les fractures dus au parachutisme (Etude statistique à propos de 2 469 163 sauts). Rev. Méd. aéron. spat. 1967, 6 (24), 11-13.
194. Roseneyer B. : Sitzhaltung unter den Arbeitsbedingungen des Piloten. "Die Wirbelsäule in der Flugmedizin" 1976, Ed. Hippokrates Verlag Stuttgart 81-96.
195. Rotondo G. : Considerazioni clinicostatistiche e medicolegali alarime tipiche fratture vertebrali da lancio d'esperienza da aviogetti mediante catapultamento con scoppolino ejettabile e relativi mezzi di prevenzione. 12° Convegno Medicina aéron. spat. Roma, 1-5 ottobre 1963.
196. Rotondo G. : Considerazioni cliniche e medicolegali su una particolare localizzazione di frattura vertebrale da lancio con scoppolino ejettabile da aviogetto F 101 G. Arch. Soc. Lomb. Med. Leg. 1966, 2 (3), 303-314.
197. Rotondo G. : Spinal Injury after Ejection in Jet Pilots. Mechanism, Diagnosis and Follow up. Report au Working A.G.A.R.D. Av. Space Environ. Med. 1975, 46 (6), 940-949.
198. Sadoff M. : A Study of Longitudinal Control problems at Low and Negative Bankings and stability with emphasis on Effects of Motion Sickness. N.A.S.A. T.N.D. 140, Janv. 1961.
199. Sais J. : Etude radiologique du rachis cervical chez les pilotes d'avions de chasse. Méd. Aéro 1958, 13 (4), 389-391

200. Bois J. : Etude radiologique du rachis cervical chez les pilotes d'avions de chasse. Le Médicin de Réserve 1962, 6, 165-167.
201. Salvagnac J., Béris H., Auffret R., Delahaye R.P. : A propos d'une éjection triple chez un nôtre pilote. Rev. Méd. Aéron. spat. 1971, 10, 34-35.
202. Sand L.D. : Comparative Injury Patterns in U.S. Army Helicopters. Operational Helicopter Aviation Medicine. A.G.A.R.D. 1978, CP 255, 54-1 à 54-3.
203. Scheier H.J.G., Ganer U. : Scheuermann - Erkrankung und Fliegerauglichkeit in "Die Wirbelsäule in der Flugmedizin" 1976. Ed. Hippokrates Verlag Stuttgart, p. 62-66.
204. Schneider R.C., Papo M., Alvarez C.S. : The effects of chronic recurrent spinal trauma in high diving a study of Acapulco divers. J. Bone Jt Surg 1962, 44 A, 648-656.
205. Schulte-Wintrop H.C., Knoche H. : Backache in U H 1 D Helicopter Crews. Operational Helicopter Aviation Medicine. A.G.A.R.D. 1978, CP 255, 19-1 à 19-12.
206. Béris H., Labussière : Ejection à travers la verrière du Mirage III-V. Rapport Centre d'Essais en Vol Brétigny 29.07.1964 - 75-117
207. Béris H., Auffret R., Fatras B., Berthoz A., Vallerie G. : Mesure des vibrations de basse fréquence sur le S.A. 3210. Rapport Centre d'Essais en Vol L.A.M.A.S. 1967, 75-127.
208. Béris H., Auffret R., Fatras B., Vallerie G., Pellouard G. : Mesure des vibrations de basse fréquence sur le S.A. 330. Rapport Centre d'Essais en Vol L.A.M.A.S. 1968, 75-114.
209. Béris H. : Les vibrations mécaniques : action sur l'homme, prévention. Rev. Corps Santé 1960, 10 (1) 63-80.
210. Béris H., Auffret R., Fatras B., Vallerie G., Pellouard G. : Mesure des vibrations sur le siège pilote du S.A. 330 équipé de différents coussins. Rapport Centre d'Essais en vol L.A.M.A.S. 1969.
211. Béris H. : Action des vibrations sur le rachis lombaire. Diplôme d'Etudes médicales relatives à la réparation juridique du Dommage corporel Paris, année 1970-1971: 1 vol. 31 pages in 4°
212. Béris H., Fatras B. : Mesure des vibrations sur H.34, Alouette II, Alouette III. Rapport Centre d'Essais en vol L.A.M.A.S. 1971.
213. Béris H., Delahaye R.P., Auffret R. : Action des vibrations sur le rachis lombaire. Cas particulier des pilotes d'hélicoptère. Rev. intern. Serv.Santé 1972, 45 (6), 477-491.
214. Shannon R.H. : Operational Aspects of Forces on man during Ejection - Extraction Escape in the U.S.A.F. 1 janv. 1968 - 31 déc. 1970, in "Linear Accidents of Impact Type" A.G.A.R.D. 1971, CP 88-71, A 1-1 à A 1-8.
215. Shannon R.H. : Analysis of Injuries during Emergency Ejection. Extraction Combat and Non-Combat Aerospace med. 1970, 41 (7), 799-803.
216. Shannon R.H., Till A.N. : S.R. 71 ejections Espace Experience. Safe 1971, 4° trim., 8-26.
217. Simson L.R. Jr : Roentgenograph in the human factors investigation of fatal aviation accidents. Aerospace med. 1972, 43, 81-85.
218. Singley G.T., Sand L.D. : U.S. Army Helicopter Accident Experience. A.G.A.R.D. 1976, CP 212.
218. Singley G.T., Desjardins S.P. : Crasworthy Helicopter seats and occupant restraint systems. in Operational Helicopter Aviation Medicine. A.G.A.R.D. CP 255, 59-1 à 59-9.
219. Sliosberg M.R. : A propos des douleurs d'hélicoptère. Conséquences thérapeutiques et prophylactiques en fonction de leur étiologie. Rev. Méd. aéron. 1962, 2 (7), 263-268.
220. Sliosberg M.R. : Sur les douleurs vertébrales des pilotes d'hélicoptère. Thèse Méd. Paris 1962, 57 pages.
221. Sliosberg M.R. : A propos des douleurs vertébrales du pilote d'hélicoptère. Analyse. Etiologie. Traitement et prophylaxie. 11^e Congrès Int. Méd. aéron. spatiale Madrid, 8-12 oct. 1962, Vol. sessions 145-152.
222. Sliosberg M.R. : Conséquences pathologiques de la position en vol du pilote d'hélicoptère. Rev. Méd. aéro. 1963, 2 (6), 134-137.
223. Smelsey G.O. : Study of Pilots who have made Multiple Ejections. Aerospace med. 1970, 41 (5), 563-566.
224. Smelsey G.O. : Diagnostics Patterns of Injury and Death in U.S.A.F. Aviation Accidents. Aerospace med. 1970, 41 (7), 790.
225. Triley J.R. : U.S.A.F. Ejection experience Decade 1952-1961. Aerospace med. 1964, 35 (2), 125-129.

226. Smiley J.R. : R.C.A.F. Ejection Experience 1962-1966. Aerospace med. 1968, 39 (6), 619-620.
227. Snyder R.G. : Human tolerance to extreme Impacts in Free Fall. Aerospace med. 1967, 34, 695-709.
228. Snyder R.G. : Terminal velocity impacts into snow. Milit. Med. 1966, 131, 1290-1293.
229. Snyder R.G., Snow C.C., Young J.W. : Pathology of trauma attributed to restraint systems in crash impacts. Aerospace med. 1968, 39, 812-819.
230. Snyder R.G. : Man's survivability of extreme forces in free - fall impact, in "Linear Accidents of Impact Type". A.G.A.R.D. 1971, CP 88-71, A 5-1 à A 5-13.
231. Snyder R.G. : Advanced techniques in crash impact protection and Emergency Egress from Air Transport Aircraft. AGARDOGRAP Juin 1976, A.G.221.
232. Snyder R.G. : Occupant Injury Mechanisms in Civil Helicopter Accidents, in "Operational Helicopter Aviation Medicine". A.G.A.R.D. 1978, CP 255, 53-1 à 53-14.
233. Stapp J.P. : Biodynamics of Deceleration, Impact and Blast in "Bandell H.V. - Aerospace Medicine" 1971, ch. 8, 118-166.
234. Stedtfeld G. : Traumatische und degenerative Wirbelsäulenschäden im Segelflug, in "Die Wirbelsäule in der Flugmedizin" 1976. Ed. Hippokrates Verlag Stuttgart 41-47.
235. Steyvers J. : Considérations sur la pathologie des pilotes d'hélicoptère Alouette III. Acta belgica militari 1969, 3-4, 343-362.
236. Swearingen J.J. : General Aviation structures directly responsible for trauma in crash deceleration F.A.A. - A.M. 71-3 Janv. 1971. Depart of transportation F.A.A. Washington.
237. Symeonides P.P. : Some observations on Compression Fractures of the spine in Ejected Greek Pilots, in "Linear Accidents of Impact Type" A.G.A.R.D. 1971, CP 88-71, A 6-1 à A 6-3.
238. Tabusse L., Delahaye R.P., Pannier R. : A propos d'une éjection d'avion à vitesse supersonique. Rev. Méd. aéron. 1962, 2 (5), 53-57.
239. Teyssandier M.J. : La colonne vertébrale du parachutiste. Vie méd. 1965, 46, 853-868.
240. Teyssandier M.J., Delahaye R.P. : Fractures du rachis chez le parachutiste (219 cas). Rev. Méd. aéron. 1967, 6 (24), 12-23.
241. Teyssandier M.J. : Atteintes traumatiques du rachis chez le parachutiste. Rev. Méd. aéron. 1967, 6 (24), 15-18.
242. Vannoni M. : Traumatologie du parachutisme, statistique à propos de 1 300 000 sauts. Thèse méd. Toulouse 1971, 66 pages.
243. Volek J. : Influences exercées sur la colonne vertébrale par le service dans l'aviation. 5^e Congrès International Médecine aéronautique Madrid 1962, vol. communications, 127-129.
244. Vulcan A.P., King A.I., Nakamura G.J. : Effects of Bending on the vertebral column during + Gz acceleration. Aerospace med. 1970, 41, 304-300.
245. Wattier J.M., Salvagniac A., Auffret R., Roubinet J., Delahaye R.P. : Fractures du rachis en vol (à propos de 2 cas rencontrés au cours de pompage). Rev. Méd. aéron. spat. 1972, 11 (42), 79-81.
246. Wisner A. : Evaluation des paramètres caractérisant le corps humain comme système de masses suspendues. C.R. Acad. Sci. 1960, 251, 1661-1663.
247. Wisner A., Donnadiou A. : Influence des vibrations sur différentes masses du corps humain. J. Physiol. 1962, 54 (2), 490.
248. Wisner A., Donnadiou A., Bertoy A. : Etude biomécanique de l'homme soumis à des vibrations de basse fréquence. Le travail humain 1965, 28 (1-2), 17-56.
249. Cicala A. : Importanza dell'indagine clinicoradiologica della colonna vertebrale nella selezione del personale aeronavigante. Riv. Med. aeron. spaz. 1966, 20 (suppl.4), 303-301.
250. Cavazzini E., Albo G. : Lo studio del rachide nella selezione del personale navigante. Riv. Med. aeron. spaz. 1966, 20 (suppl.4), 448-459.
250. Tournier M. : Rapport sur les Accidents et Incidents 1979. Commission Mixte d'Information bis française de Parachutisme, mars 1980 (document interne).
- 250 Meek T.S. : Helicopter personnel survivability equipment. Escape problems and Manoeuvre in ter Combat Aircraft. A.G.A.R.D. C.P. 134, A 10-1 A 10.6.

II. - PATHOLOGIE RACHIDIENNE

251. Akeson W.H., Woo S.L.Y., Taylor T.K.F., Ghosh P., Bushell G.R. : Biomechanics and Biochemistry of the Intervertebral Disks. The Need for correlation Studies. Clinic, Orthop. 1977, 129, 133-140.
252. Andersson B.J.G., Jonsson B., Ortengren R. : Myoelectric activity in individual erector spinae muscles in sitting. A study with surface and wire electrodes. Scand. J. Rehab. Med. 1974, suppl. 3, 91-108.
253. Andersson B.J.G., Ortengren R. : Myoelectric back muscle activity during sitting. Scand. J. Rehab. Med. 1974, suppl. 3, 73-90.
254. Andersson B.J.G., Ortengren R., Nachemson A., Elfström G. : Lumbar disc pressure and myoelectric back muscle activity during sitting. Scand. J. Rehab. Med. 1974, 6, 104-114.
255. Andersson B.J., Ortengren R., Nachemson A. : Intradiscal Pressure, Intra-abdominal Pressure and Myoelectric Back Muscle Activity related to posture and Loading. Clin. Orthop. 1977, 129, 156-174.
256. Anderson L.D., D'Alonzo R.T. : Fractures of the odontoid process of the axis. J. Bone Jt Surg 1974, 56 A, 1663-1691.
257. Arndt R.D. : Cervical Thoracic Transverse process fracture : further observations on the seat belt syndrome. J. Trauma 1975, 15 (7), 600-602.
258. Babin S., Katzner M., Schvingt E. : Entorses graves du rachis cervical inférieur et leurs conséquences. Un cas de luxation ancienne méconnue. Nelle Presse Méd. 1975, 4, 2033-2034
259. Bauze R.J., Ardran G.M. : The mechanism of forward dislocation in the human cervical spine. J. Bone Jt Surg 1975, 57 B, 239-245.
260. Benassy J. Diagnostic et traitement des lésions traumatiques de la colonne cervicale. Rev. Prat. (Paris) 1963, 13 (3), 1529-1548.
261. Bertheaux D., Saillant G., Roy-Camille R. : Sémiologie radiologique des fractures du rachis lombaire. Regardons la vertèbre dans les yeux. Nelle Presse Méd. 1976, 5, 2065-2066.
262. Blery M., Prebay Th. : Les fractures du rachis de l'adulte en traumatologie. Cours de perfectionnement post-universitaire. Société franç. Radiol. Méd. 1978, 13 pages.
263. Braakman R., Penning L. : Injuries of the cervical spine. 1 vol. 1971. Amsterdam. Excerpta Medica , 273 pages.
264. Brander M.E. : Normal values of the vertebral body and intervertebral Disk index in adults. Am. J. Roentgenol. 1972, 114 (2), 411-414.
265. Brashear H.R., Venters G.C., Preston E.T. : Fractures of the neural arch of the axis. J. Bone Jt Surg 1975, 57 A, 879-887.
266. Brocher J.E.W. : Die Wirbelsäulenleiden und deren differential Diagnose. 1 vol. 684 pages, 1057 fig., 1965, 4^e éd., G. Thieme Ed. Stuttgart.
267. Brown T., Hansen R.J., Yorra A. : Some mechanical tests on the lumbosacral spine with particular reference to the intervertebral disks. J. Bone Jt Surg 1957, 39 A, 1135-1164.
268. Burke D.C. : Hyperextension injuries of the spine. J. Bone Jt Surg 1971, 53 B, 3-12.
269. Bussat P., Rossier A.B., Djindjian R., Vasey H., Berney J. : Spinal cord Angiography in Dorsolumbar vertebral fractures with neurological involvement. Radiology 1973, 109, 617-620.
270. Calneff L., Chessare J.W., Rogers L.F., Toerge J., Rosen J.S. : Multiple Level Spinal Injuries. Importance of Early Recognition. Am. J. Roentgenol. 1978, 130, 665-669.
271. Carrel T.B., Gruber F.H. : Seat belt fractures. Radiology 1968, 91, 517-518.
272. Claisse R.H. : Les traumatismes de la colonne cervicale. Méd. Lég. Dom. Corp. 1968, 1, 243-252.
273. Claisse R.H. : Les traumatismes du rachis cervical. Les Cahiers Sandoz 1970, n° 16, 1-49.
274. Cren M. : Les aspects radiologiques des fractures du rachis (Etude de 411 fractures observées en 7 ans). Mém. pour le Certificat d'Etudes Spéciales de Radiologie Paris 1967, 90 pages, in 4°.

275. Crocos J. : Spondylolisthesis et traumatismes, conséquences médico-légales. Diplôme d'Etudes médicales relatives à la réparation juridique du dommage corporel, Paris 1974-1975.
276. Cyron B.M., Hutton W.C., Troup J.D.G. : Spondylolytic fractures. J. Bone Jt Surg 1976, 58 B, 462-466.
277. Day B., Kokan P. : Compression fractures of the thoracic and lumbar spine from compensable injuries. Clinic Orthop. 1977, 129, 173-176.
278. Decoulx P., Soulier A. : Le diagnostic de l'épiphysite lombaire et des fractures marginales. Lille Chir. 1955, 10, 55-63.
279. Decoulx P., Rieunau G. : Les fractures du rachis dorso-lombaire sans trouble nerveux. Rev. Chir. Orthop. 1958, 44, 254-322.
280. Decoulx P., Razemon J.P., Ducloux M. : Fractures du rachis cervical sans complications neurologiques. Lille Chir. 1962, 17, 159-171.
281. Dehner J. : Seat belt injuries of the spine and abdomen. Am. J. Roentgenol. 1971, 111, 833-844.
282. Dehouve A., Tonnelier M., Delahaye R.P., Metges P.J., Raynaud J.P. : Spondylolisthésis et traumatisme. Le rôle de la radiologie dans les problèmes médico-légaux. Méd. et Armées 1977, 5, 547-553.
283. Delahaye R.P., Mangin H., Cren M. : Radiologie des fractures et des traumatismes du rachis. 1 vol. 1969, Ed. Delachaux Niestlé Paris, 110 pages.
284. Delahaye R.P., Gueffier G., Metges P.J. : Intérêt de la radiologie dynamique du rachis cervical en pathologie traumatique. Entretien Bichat 1971, vol. chir. spec., 247-252.
285. Delahaye R.P., Metges P.J. : Généralités sur le rachis. Technique radiologique et aspects normaux. Encycl. Méd. Chir. Radiodiagnostic, 1, 30 500 A 10, 10 pages, 18 figures.
286. Delahaye R.P., Gueffier G. : Rachis cervical. Technique radiologique et aspects normaux. Encycl. Méd. Chir. Radiodiagnostic, 1, 30 550 A 10 et B10, 34 pages, 51 fig.
287. Delahaye R.P., Jolly R. : Rachis dorsal. Technique radiologique et aspects normaux. Encycl. Méd. Chir. Radiodiagnostic, 2, 30 600 A 10, 18 pages, 25 fig.
288. Delahaye R.P., Metges P.J. : Rachis lombaire. Technique radiologique et aspects normaux. Encycl. Méd. Chir. Radiodiagnostic, 2, 30 650 A 10 et B 10, 34 pages, 71 figures.
289. Delahaye R.P., Gueffier G. : Qu'est-ce qu'un rachis normal ? Réflexion à propos de 2500 examens radiographiques pratiqués chez de jeunes français âgés de 19 à 23 ans. Entretiens Bichat 1972, vol. Chir. Spéc. 291-298.
290. Delahaye R.P., Gueffier G., Metges P.J. : La normalité du rachis. Méd. légale et Dommage corporel 1973, 6 (3), 278-283.
291. Delahaye R.P., Gueffier G., Metges P.J., Nathalie J. : La normalité dans l'examen radiologique du rachis. Méd. et Armées 1973, 1, 15-23.
292. Delahaye R.P., Metges P.J. : Anomalies congénitales du rachis. Ency. Méd. Chir. Radiodiagnostic 1975, 31 310, 32 pages
293. Delahaye R.P., Metges P.J. : Aspects radiologiques des fractures du rachis. Encycl. Méd. Chir. Radiodiagnostic 1976, 2, 31 040 B 10, 39 pages.
294. Delahaye R.P., Metges J.P., Mine J., Casanova G., Flageat J. : Traumatisme dorsolombaire : le rôle de la radiologie dans le diagnostic de la stabilité ou de l'instabilité des foyers fracturaires. Méd. et Armées 1977, 5, 522-524.
295. De Olivera A. : New type of fracture dislocation of the thoracolumbar spine. J. Bone Jt Surg 1978, 60 A, 481-488.
296. Delrieu F. : Problèmes posés par les anciens traumatisés du rachis cervical. Gazette Méd. France 1971, 78 (24), 3915-3923.
297. Demilly J. : Le syndrome de Kummel-Verneuil n'existe pas. Thèse Médecine Lille 1958.
298. Dolan K.D. : Cervical spine injuries below the axis. Radiol. Clin. North-America 1977, 15 (2), 247-259.
299. Doury P., Pattin S. : Traumatisme et spondylarthrite ankylosante. Rhumatologie 1973, 25 (5), 205-206.
300. Doury P., Pattin S. : Séquelles tardives des traumatismes cervicaux sans lésion osseuse et cervicarthrose. Am. Méd. accidents du trafic 1974, 9-10.

301. Deury P., Jolly R., Delahaye R.P., Metzger P.J., Pattin S., Flageat J. : Les blocs vertébraux de la maladie de Scheuermann (à propos de 7 observations). Médecine et Armées 1978, 6 (3), 269-271.
302. Doury P. : Spondylarthrite ankylosante. Encycl. Méd. Chir. Paris. Appareil locomoteur 1979, 14230 A 10.
303. Dreyfus P., Dearey M., Hubault A. : Complications cervicales des accidents d'automobile, in "Actualité Rhumatologique" 1967, Ed. S. de Sèze, p. 233-243. Expansion Scientifique Française.
304. Dubouloz P., Legre J., Merjanian R. : Etude radiologique et valeur statistique des corps vertébraux lombaires à tendance cunéiforme. J. Radiol. Electrol. 1961, 46 (11), 629-641.
305. Durant J. : Diagnostic et traitement du spondylolisthésis. Concours Méd. 1973, 95, 2465-2478.
306. Eismont F.J., Bohlman H.H. : Posterior atlanto-occipital dislocation with fractures of the atlas and odontoid process. J. Bone Jt Surg. 1978, 60 A, 397-399.
307. Epstein B.S. : The spine, a radiological text and atlas. 1 vol. Lea and Febiger 1970, 1 vol., 730 pages, 1970.
308. Essel L. : Contribution à l'étude radiologique des traumatismes de la colonne cervicale en expertise radiologique. Mémoire pour le Certificat d'Etudes Spéciales de Radiologie Paris, 1960, 48 pages in 4°.
309. Evans F.G., Lissner H.R. : Biomechanical studies on the lumbar spine and pelvis. J. Bone Jt Surg. 1959, 41 A, 273-282.
310. Evans F.G. : Stress and strain in bones. 1 livre 1959 Charles C. Thomas Springfield.
311. Farfan H.F., Cossette J.W., Robertson G.H., Wells R.V., Kraus H. : The effects of torsion on the lumbar intervertebral joints : the role of torsion in the production of disc degeneration. J. Bone Jt Surg 1970, 52 A, 468.
312. Farfan H.F. : Mechanical Disorders of the low back. 1 livre 1973, Lea et Febiger, Philadelphie.
313. Farfan H.F. : Muscular mechanism of the lumbar spine and the position of power and efficiency. Orthop. Clin. North Amér. 1975, 6, 135.
314. Fielding J.W., Hawkins R.J. : Atlanto-axial rotatory fixation. J. Bone Jt Surg 1977, 59 A, 37-44.
315. Fiorini G.T., Mac Cammond D. : Forces on lumbo vertebral facets. Ann. Biomed. engin 1976, 4, 354-363.
316. Fischer L. : Fractures et luxations fermées du rachis cervical chez l'adulte (à propos de 164 observations personnelles). Thèse Médecine Lyon 1967, 225 pages.
317. Fischer L., Genon G.P., Carret J.P., Dimmet J. : Biomécanique des ostéosynthèses vertébrales postérieures au niveau dorsolombaire. Rev. Chir. Orthop. 1977, 63, 463-466.
318. Fischer V. : Spätschäden der Wirbelsäule nach Belastung in "Die Wirbelsäule in der Flugmedizin" 1 vol. 1976, Ed. Hippokrates Verlag Stuttgart, 32-35.
319. Flageat J. : Aspects radiologiques des séquelles de la localisation dorsale de la maladie de Scheuermann. Mémoire pour le Certificat d'Etudes Spéciales de Radiodiagnostic Paris, 1977, 1 vol. 76 pages in 4°.
320. Foreyth M.F. : Extension injuries of the cervical spine. J. Bone Jt Surg 1964, 46 A, 1792-1797.
321. Galante J.J. : Tensite properties of the human lumbar Annulus Fibrosus. Acta Orthop. Scand. 1967, suppl. 100, 5-91.
322. Giard P., Empereur-Buisson R., Choteau Ph., Leroy J.P. : Aspects sémiologiques et radiologiques des fractures de l'apophyse odontoïde. A propos de 6 cas observés en 7 ans dans un service de médecine générale. Sem. Hôp. Paris 1970, 46, 929-938.
323. Gordon J.P. : Flexion injuries of the cervical spine. J. Bone Jt Surg 1964, 46, 1800-1806.
324. Gracovetsky S., Farfan H.F., Lamy C. : A mathematical Model of the lumbar spine using an optimized system to Control Muscles and Ligaments. Orthop. Clin. North Am. 1977, 8, 135-153.
325. Gregersen G.G., Lucas D.B. : An in vivo study of the axial rotation of the human thoraco-lumbar spine. J. Bone Jt Surg 1967, 49 A, 247-262.
326. Gregoire R., Oberlin : Précis d'anatomie. 1 vol. 1946, Baillière J.B. Ed. Paris.

327. Gros C., Vlahovitch B., Frerebeau Ph., Allieu Y., Ouaknine G. : Tétaplégies aigües traumatiques sans lésion osseuse (étude d'une série de 40 ans). Sem. Hôp. Paris 1968, 44, 2536-2544.
328. Guglielmino P. : Traumatismes et rhumatismes inflammatoires. Thèse Médecine Paris Cochin Port-Royal 1977.
329. Guilleminet M., Lacour R. : Sur la nature du spondylolisthésis. Rev. Méd. 1951, 59, 101-102.
330. Guilleminet M., Michel C.R. : Fractures verticales de la colonne lombaire. Lyon Chir 1959, 55, 475-478.
331. Hadley L.A. : Anatomicorventgenographic studies of the spine. 1 vol. 1976, Edit. Charles C. Thomas.
332. Hartung C., Anna O. : Biomechanische Eigenschaften weicher gewebe, in "Die Wirbelsäule in der Flugmedizin" 1976, Ed. Hippokrates Verlag, Stuttgart 86-95.
333. Hayes W.C., Carter D.R. : The effect of narrow on energy absorption of trabecular bone. 22° Meeting of Orthopedic Research. Society New Orleans 1976, cité d'après White A.A.III et Panjabi (449).
334. Hirsch C. : The reaction of intervertebral discs to compression forces. J. Bone Jt Surg 1955, 37 A, 1188.
335. Hirsch C., Lewin T. : Lumbosacral synovial joints in flexion-extension. Acta Orthop.Scand. 1968, 39, 303.
336. Holdsworth F.W. : Fractures, Dislocations and Fractures-Dislocations of the spine. J. Bone Jt Surg 1963, 45 B, 6-20.
337. Holdsworth F.W. : Fractures, Dislocations and Fractures-Dislocations of the spine. J. Bone Jt Surg 1973, 52 A, 1534-1551.
338. Huard C., Postel M. : Fracture-éclatement de D.10. Rev.Chir. Orthop. 1977, 63, 519-552.
339. Hubbard D.D. : Fractures of the dorsal and lumbar spine. Orthop. Clinics North America 1976, 7, 605-614.
340. Huelke D.F., Mendelsohn R.A., States J.D., Melvin J.W. : Cervical fractures and fracture-dislocations sustained without head impact. J. Trauma 1978, 18, 533-538.
341. Judet R., Judet J., Roy-Camille R., Zerah J.Cl., Saillant G. : Fractures du rachis cervical. Fracture séparation du massif articulaire. Rev. Chir. Orthop. 1970, 56, 155-166.
342. Jung A., Kehr P. : Du spondylolisthésis traumatique spondylose transformée en spondylolisthésis par le traumatisme. Presse Méd. 1967, 75, 2149-2152.
343. Jung A., Kehrp. : Les traumatismes du rachis cervical avec lésions vasculaires. J. Chir. 1970, 99, 127-144.
344. Kazarian L.E. : Creep characteristics of the human spinal column. Orthop. Clin. North Amér. 1975, 6, 3-18.
345. Kazarian L.E. : Dynamic response. Characteristics of the human vertebral column. An experimental study on human autopsy specimens. Thèse Stockholm 1972.
346. Kazarian L.E., Boyd D.D., Gierke H.E. Von : The dynamic Biomechanical Nature of Spinal fractures and Articular Facet Derangement. Linear Acceleration of Impact Type. A.G.A.R.D. 1971, CP 88, 19-1 à 19-9.
347. Kershner M.S., Goodman G.A., Perlmutter G.S. : Computed tomography in the Diagnostic of an Atlas Fracture. Am. J. Roentgenol. 1977, 128, 688-689.
348. Krentz J., Stanmore J.D.G. : The structure of the pars interarticularis of the lower lumbar vertebrae und its relation to the etiology of spondylolysis. J. Bone Jt Surg 1973, 55 B, 735-741.
349. Kulak R.F., Schulz A.B., Belytschko J., Galante J. : Biomechanical characteristics of vertebral motion segments and intervertebral discs. Orthop. Clin. North America 1975, 6, 121-133.
350. Lafferty J.F., Winter W.G., Gambaro S.A. : Fatigue charac teristics of posterior elements of vertebrae. J. Bone Jt Surg. 1977, 59 A, 155-158.
351. Lamy C., Bazergui A., Kraus H., Farfan H.F. : The strength of the neural arch and the etiology of spondylolysis. Orthop. Clin. North Amer. 1975, 6, 215-231.
352. Lance P. : Relations de la spondylose et du spondylolisthésis avec le traumatisme. Presse Méd. 1967, 75, 2149-2152.

353. Lance P., Weber R. : Fractures du rachis dorsolombaire (signes, évolution et traitement) Rev. Prat. (Paris) 1963, 13, 1551-1571.
354. Lance P. : Séquelles de traumatismes du rachis lombosacré. Aspects médico-légaux. Méd. Lég. Dommage corporel 1969, 2, 54-57.
355. Lance P. : Traumatisme et spondylolisthésis. Incidences médico-légales. Nelle Presse Méd. 1972, 1, 15-18.
356. Lance P. : Lombalgies et lombosciatiques post-traumatiques. Expertise et incidences médico-légales. Rev. Prat. (Paris) 1972, 22, 3085-3086.
357. Laplane D. : Le syndrome de Kummel-Verneuil existe-t-il ? Rev. Prat (Paris) 1963, 13, 1611-1613.
358. Laurence G. : Anatomie pathologique des fractures du rachis (spécialement dorso-lombaire). Rev. Prat (Paris) 1963, 13, 1505-1517.
359. Lavarde G. : L'influence du trafic sur le rachis cervical. Le point de vue orthopédique. Ann. Méd. accidents Trafic 1966, 91-97.
360. Lavarde G. : Les fractures de l'axis. Bull. Mém. Soc. Chir. Paris 1973, 63, 90-102.
360. Lavarde G. : Les fractures molées des apophyses articulaires du rachis cervical. bis J. Chir. 1973, 105, 241-248
361. Lee B.C.P., Kazam E., Newman A.D. : Computed tomography of the spine and spinal cord. Radiology 1978, 128, 95-102.
362. Leo J.S., Bergeron R.T., Kricheff I.I., Benjamin M.D. : Metrizamide myelography for cervical spinal cord injury. Radiology 1978, 129, 707-711.
363. Levy-Lebhar J.P. : Hernies rétromarginales antérieures. Etude clinique et radiologique. Thèse Médecine Paris 9153.
364. Lin H.S., Liu Y.K., Adams J.H. : Mechanical response of the Lumbar Intervertebral Joint unter Physiological (complex) Loading. J. Bone Jt Surg. 1978, 60 A, 41-55.
365. Lindhal O. : Mechanical properties of fried defatted spongy bone. Acta Orthop. Scand. 1976, 47, 11.
366. Liu Y.K., Ray G., Hirsch C. : The resistance of the Lumbar spine to direct Shear. Orth. Clin. North Am. 1975, 6.
367. Louis R. : Traumatismes du rachis cervical
a a) I. Entorses et hernies discales
et Nelle Presse Méd. 1979, 8, 1843-1849
b b) II. Fractures et luxations
Nelle Presse Méd. 1979, 8, 1931-1937
368. Lucas D.B., Bresler B. : Stability of the ligamentous spine. Biomechanics Laboratory Univ. Calif. San Francisco and Berkeley - Tech Report Ser 11, Re 40, 1961 (cité d'après Penjabi, White) (392).
369. Macciocchi B., Vannoni S. : La semiotica delle fratture isolate delle apofisi trasverse vertebrali. Arch. Putti 1962, 17, 349-359.
370. Mac Kenzie J.A., Williams J.F. : The dynamic behaviour of the head and cervical spine during whip lash. J. Biomechan. 1971, 4, 477-490.
371. Maravilla K.R., Cooper P.R., Sklar F.H. : The influence of thin section tomography on the treatment of cervical spine injuries. Radiology 1978, 127, 131-139.
372. Mangin H., Buchet R., Delahaye R.P., Dubost J. : Traumatismes du rachis. Le soi-disant syndrome de Kummel-Verneuil et le syndrome secondaire traumatique. Entretiens Bichat 1965, Vol. Chir Spéc., 407-412.
373. Markloff K.L., Morris J.M. : The structural components of the intervertebral discs. J. Bone Jt Surg 1974, 56 A, 675.
374. Martel W., Seeger J.F., Wicks D., Washburn R.L. : Traumatic lesions of the disco-vertebral junction in the Lumbar Spine. Am. J. Roentgenol. 1976, 127, 457-464.
375. Maurer H.J. : Das Schleudertrauma der Halswirbelsäule in "Die Wirbelsäule in der Flugmedizin", 1 vol. 1976, Hippokrates Verlag Stuttgart, p. 24-31.
376. Miller M.D., Gehweiler J.A., Martinez S., Charlton O.P., Daffner R.H. : Significant New observations on cervical spine Trauma. Am. J. Roentgenol. 1978, 130, 659-663.

378. Nachemson A. : Lumbar Interdiscal Pressure. Acta Orthop, Scand. 1960, suppl. 43.
379. Nachemson A. : The influence of spinal movements on the lumbar intradiscal pressure and on tensile stresses in the annulus fibrosus. Acta Orthop, Scand 1963, 33, 183.
380. Nachemson A., Morris J.M. : In vivo measurements of intradiscal pressure : Discometry a method for the determination of pressure in the lower lumbar discs. J. Bone Jt Surg. 1964, 46, 1077-1092.
381. Nachemson A., Evans J. : Some mechanical properties of the third lumbar interlaminar ligaments (ligamentum flavum). J. Biomechan. 1968, 1, 211.
382. Nachemson A. : Electromyographic studies on the vertebral portion of the psoas muscle. Acta. Orthop, Scand. 1966, 37, 177-190.
383. Nachemson A., Elfström G. : Intravital Dynamic Pressure Measurements in Lumbar Disc. A study of common movements, maneuvers and exercises. Scand. J. Rehabil. Méd. 1970, 1, 1-40.
384. Nachemson A. : The lumbar spine, an orthopaedic Challenge. Spine 1976, 1, 59.
385. Nathan : The spondylolysis. J. Bone Jt Surg. 1959, 41 A, 303-319.
386. Nicoll E.A. : Fractures of the Dorsolumbar spine. J. Bone Jt Surg. 1949, 31 B, 376-394.
387. Noyes F.R., De Lucas J.L., Torvik P.J. : Biomechanics of ligament failure an analysis of immobilization, exercise and secondconditioning effects in primates. J. Bone Jt Surg. 1974, 56 A, 1406.
388. Padovani P. : Conduite à tenir en présence des traumatismes cervicaux. Gas. Méd. France 1969, 76, 1727-1734.
389. Panjabi M.M., White A.A.III, Johnson R.M. : Cervical spine mechanics as a function of transection of components. J. Biomechanics 1975, 8, 327-336.
390. Panjabi M.M., Brand R.A.jr, White A.A.III : Mechanical properties of the human thoracic spine J. Bone Jt Surg 1976, 58 A, 642-652.
391. Panjabi M.M., Krag M.H., White A.A. III, Southwick W.O. : Effects of Preload on Load Displacement Curves of the Lumbar Spine. Orthop. Clin, North Am. 1977, 8, 181-192.
392. Panjabi M.M., White A.A. III : Physical properties and functional Biomechanics of the Spine, in "Clinical Biomechanics of the Spine". 1 vol. 1978, Lippincott Company, Chapitre I, 1-60.
393. Parke W.W., Schiff D.C.M. : The applied anatomy of the intervertebral disc. Orthop. Clin. North Am. 1971, 2, 309-324.
394. Penning L. : Normal movements of the cervical spine. Am. J. Roentgenol. 1978, 130, 317-326.
395. Perry O. : Fracture of the vertebral endplate in the lumbar spine. Acta Orthop, Scand. 1957, 27 suppl.
396. Perry O. : Resistance and compression of the lumbar vertebrae. Encyclopedia of Medical Radiology. New York Springer Verlag 1974.
397. Perves A., Pidhors L. : Fractures du rachis dorsal et lombaire. Rev. Chir. Orthop. 1973, 59, 491-512.
398. Perves A. : Fractures du rachis dorsal et lombaire. Indications opératoires et résultats. Bull. Mém. Soc. Chir. Paris 1972, 62, 364-370.
399. Pitman M.I., Pitman C.A., Syosset, Greeberg I.M. : Complete dislocation of the cervical spine without neurological deficit. J. Bone Jt Surg 1977, 59 A, 134-135.
400. Pope M.H., Wilder D.G., Buturia E., Matteri R., Frymoyer W.W. : Radiographic and Biomechanical Studies of the Human Spine A.F.O.S.R. 78-63. Depart of Orthopaedic Surgery Univ. Vermont. Burlington.
401. Pouyanne L., Gourdon A. : Spondylolisthésis L5-S1 traumatique par luxation fracture. Bordeaux Chir. 1965, 1, 108-110.
402. Rackers Ch.de, Ectors L. : La pathologie de la colonne cervicale. Acta Orthop. Chir. (Belg.) 1961, 40-405.
403. Ramadier J.O., Bombart M. : Fractures et luxations du rachis cervical sans lésions médullaires 1ère parties : Lésions des 2 premières cervicales. Rev. Chir. Orthop. 1963, 49, 741-762.
404. Ramadier J.O., Bombart M. : Fractures et luxations du rachis sans lésions médullaires. 2ème partie : Lésions des cinq dernières vertébrales cervicales. Rev. Chir. Orthop. 1964, 50, 3-34.

405. Hamadier J.O., Aleon J.F., Servant J. : Les fractures de l'apophyse odontoïde (94 cas dont 61 traités par arthrodièse). Rev. Chir. Orthop. 1976, 62, 171-189.
406. Roaf R. : Rotation movements of the spine with special reference to scoliosis. J. Bone Jt Surg. 1958, 40 B, 312.
407. Roaf R. : A study of the Mechanics of Spinal Injuries. J. Bone Jt Surg. 1960, 42 B, 810-823.
408. Rookoff S.D., Sweet E., Bleustein J. : The relative contribution of trabecular and cortical bone to the strength of human lumbar vertebrae. Calcif. Tissu. Res. 1969, 3, 163.
409. Rolander S.D. : Motion of the Lumbar spine with special reference to the stabilizing effect of posterior fusion. Thesis. Acta Orthop. Scand. 1966, suppl. 99.
410. Rolander S.D., Blair W.E. : Deformation and fracture of the lumbar vertebral end plate. Orthop. Clin. North Am. 1975, 6, 75-79.
411. Roy-Camille R., Lelievre J.F. : Pseudarthrose des corps vertébraux du rachis dorso-lombaire. Rev. Chir. Orthop. 1975, 61, 249-257.
412. Russel W.J., Nakata H. : Spondylolisthesis following trauma : a case report. Radiology 1968, 91, 973-974.
413. Saillant G. : Etude anatomique des pédicules vertébraux. Rev. Chir. Orthop. 1976, 62, 151-160.
414. Sassard W.R., Heinig C.F., Pitts W.R. : Posterior atlanto-axial dislocation without fracture. J. Bone Jt Surg. 1974, 56 A, 625-628.
415. Scher A.T. : Unilateral Locked Faced in Cervical Spine Injuries. Am. J. Roentgenol. 1977, 129, 45-48.
416. Schmorl G., Junghanns H. : Clinique et radiologie de la colonne vertébrale normale et pathologique. 1 vol. 1956, Doin Paris.
417. Schultz A.B., Belytschko T.B., Andriacchi T.P., Galante J.O. : Analog Studies of Forces in the Human Spine : Mechanical Properties and Motion Segment Behavior. J. Biomechanics 1973, 6, 373-383.
418. Serre H. : Spondylolyse traumatique vraie : fracture isolée des isthmes de L5 antérieurement normaux. Rev. Rhum. 1956, 23, 44-47.
419. Serre H., Labauge R., Simon L., Lamboley C. : Le syndrome sympathique cervical postérieur dit syndrome de Barré-Lieou existe-t-il ? Sem. Hop. Paris 1970, 46, 1567-1586.
420. Sèze S. de, Durieux J. : Le spondylolisthésis : Etude clinique et radiologique d'après 70 observations personnelles. Sem. Hop. Paris 1947, 23, 1551-1578.
421. Sèze S. de, Rotes-Querol J. : Hernie discale rétromarginale antérieure. Sem. Hop. Paris 1949, 25, 3964-3973.
422. Sèze S. de, Djian A., Levy-Lebhar JJP. : Les hernies rétromarginales antérieures à la région lombaire et lombosacrée. Rev. Rhum. 1950, 17, 491-497.
423. Shapiro R., Youngberg A.S., Rothman S.L.G. : The differential diagnosis of traumatic lesions of the occipito-atlanto-axial segment. Radiol. Clin. North. Am. 1973, 11, 505-526.
424. Sicard A. : Chirurgie du rachis. 1 livre 1959, Ed. Masson Paris.
425. Sicard A., Leca A. : De l'origine traumatique de certains spondylolisthésis. Presse Méd. 1960, 31, 1207-1210.
426. Sicard A., Loisel P. : Fractures des pédicules de l'axis et plus particulièrement son mécanisme. J. Chir (Paris) 1971, 102, 517-526.
427. Siffre A. : Spondylolisthesis et traumatisme : Mém. Diplôme Docteur en Médecine Paris 1967-1968.
428. Simonin J.L. : Le spondylolisthésis lombaire. Etude de 727 cas. Thèse Méd. Paris 1966.
429. Smith G.R., Northrop C.H., Lool J.W. : Jumper's Fractures : patterns of thoracolumbar Spine. Injuries associated with vertical plunges. A review of 38 cases. Radiology 1977, 122, 657-663.
430. Soechting J.F., Paslay P.R. : A model for the Human Spine during Impact including Musculature Influence. J. Biomechanics 1973, 6, 195-203.
431. Stauffer E.S., Kelly E.G. : Fracture dislocations of the cervical spine. J. Bone Jt Surg. 1977, 59 A, 45-48.

432. Stringa G. : Lesioni traumatiche della colonna cervicale (statistica e classificazione). Archivio Putti 1965, 20, 53-76.
433. Stuhl L., Martin H., Picard J. : A propos des fractures isolées de l'atlas. Presse Méd. 1969, 67, 1879-1882.
434. Symeonides P., Caracostas M., Vayanos E., Capetis P., Economou C. : Fractures de l'apophyse odontoïde de l'axis. Rev. Chir. Orthop. 1976, 62, 405-412.
435. Taillard W. : Les spondylolisthésis. 1 vol. Paris. Ed. Masson 1957.
436. Taillard W. : Traumatisme et spondylolisthésis. Acta Orthop. Belg. 1969, 35, 703-716.
437. Taillard W. : Etiology of spondylolisthesis. Clinic. Orthop. 1976, 117, 30-39.
438. Tardif J. : Traumatisme et spondylolisthésis. Incidences médico-légales. Mémoire Diplôme Docteur en Médecine 1972-1973.
439. Taylor T.K.F., Little K. : Intercellular Matrix of the Intervertebral Disc in Ageing and in Prolapse. Nature 1965, 208, 384-386.
440. Taylor T.J.F., Akeson W.H. : Intervertebral Disc Prolapse : a Review of morphologic and biochemic knowledge concerning the nature of prolapse. Clinic. Orthop. 1971, 76, 54-69.
441. Taylor T.K.F., Wade S., Bannister J.H. : Seat belt fractures of the cervical spine. J. Bone Jt Surg. 1976, 58 B, 328-331.
442. Testut L. : Traité d'anatomie humaine. 1 vol. 1893, Ed Doin Paris.
443. Tkaczuk H. : Tensile properties of human lumbar longitudinal ligaments. Acta Orthop. Scan. 1968, suppl. 115, 8-69.
444. Vignon G. : Les traumatismes cervicaux des accidents d'auto (traumatismes mineurs et séquelles). Rev. Prat. (Paris) 1968, 18, 1821-1831.
445. Virgin W. : Experimental investigations into physical properties of intervertebral disc. J. Bone Jt Surg. 1951, 33 B, 607.
446. Wackenheim A. : Une observation privilégiée de whip lash injury. J. Radiol. Electrol. 1973, 54, 69-71.
447. Wackenheim A. : Traumatismes indirects du rachis cervical (coup de fouet, coup de lapin, cisaillement) Whip lash injury, syndrome cervical post-traumatique. Feuillets Electroradiol. 1968, n° 45, 1-12.
448. Watson-Jones R. : Fractures et lésions articulaires traumatiques. Adaptation française d'après la 4^e édition anglaise par J. Roussel 1958, Tome III, 989-1091. Ed. Delachaux et Niestlé Paris.
449. White A.A. III, Penjabi M.M. : Clinical Biomechanics of the spine. 1 vol. 1978. J.B. Lippincott Company, 534 pages.
450. Whitley J.E., Forsyth H.F. : The classification of cervical spine injuries. Am. J. Roentgenol. 1960, 83, 633-644.
451. Williams H.S., Jayson M.I.V., Baddley H. : Small spinal fractures in back pain patients. Annals Rheum. Dis. 1978, 37, 262-265.
452. Wiltse L.L. : Etiology of spondylolisthesis. J. Bone Jt Surg. 1957, 39 A, 447-453.
453. Wiltse L.L., Widell Jr E.H., Jackson D.W. : Fatigue fracture : The basic lesions in isthmic spondylolisthesis. J. Bone Jt Surg. 1975, 57 A, 17-22.
454. Wolbrink A.J., Janes J.M., Beabout J.W. : Occult roentgenographic changes in the cervical spine. May. Clin. Proc. 1974, 49, 879-883.
455. SèneSde Rycwaert : Maladies des os et des articulations, 1 vol. 1958-1980. Edition Flammarion.

I N D E X

A

Abandon de l'avion et parachutisme, 99
 Absence de soudure du coin antérieur, 178
 Accélération, 47
 - de Coriolis, 47
 Accélération dans le crash, 64
 Accélération (transmission des -) et coussin, 90
 Accidents de centrifugeuses, 132
 - sur rampes de sièges éjectables, 135
 - sur traineaux propulsés, 135
 Accidents d'hélicoptères, 66
 Accrochage du parachutiste à l'avion, 99
 Admission au personnel navigant et rachis, 264
 Affections acquises du rachis, 278
 Algies des pilotes d'hélicoptère, 226
 Angles de confort, 231
 Angle inclus, 90
 Angle sacrovertébral, 268
 Annulus fibrosus, 21
 Anomalies congénitales du rachis, 275
 Anomalies du listel marginal dans la maladie de Scheuermann, 272
 Apophyse odontoïde (fractures), 199
 Apophyses articulaires, 11
 Apophyses transverses
 - Aspect normal des -, 11
 - Fractures des -, 61, 185, 196
 Aptitude au personnel navigant et - anomalies transitionnelles de la charnière lombosacrée, 275, 280
 - arthrose vertébrale, 292
 - bloc congénital, 276, 280
 - cyphose, 271, 279
 - déhiscence des apophyses épineuses, 275
 - fractures du rachis dorso-lombaires, 286
 - fractures du rachis cervical, 287
 - hernie discale, 298
 - hernie rétromarginale antérieure, 280
 - intervention chirurgicale sur le rachis, 293, 298.
 - lyse isthmique, 280
 - maladie de Scheuermann (séquelles), 274, 280
 - scoliose dorso-lombaire, 266, 279
 - séquelles d'épiphyse, 274, 280
 - spondylarthrite ankylosante, 294
 - spondylolyse, 276, 280
 - spondylolisthésis, 276, 280
 Arc neural (rupture de l'-), 43
 Arc postérieur
 atteintes traumatiques de l'-, 153, 160, 161
 Arthrose cervicale, 289
 Arthrose cervicale post-traumatique, 300
 Arthrose et traumatisme, 300
 Arthrose lombaire, 290
 Arthrose vertébrale
 - aspects médico-aéronautiques, 291
 - aptitude et thérapeutique dans l'-, 293
 - décision d'aptitude dans l'- et traumatisme, 292, 300
 - pathogénie de l'-, 289
 - post-traumatique, 300
 - responsabilité du vol dans l'-, 291
 Articulation
 - atloïdo-axoïdienne, 25
 - atloïdo-odontoïdienne, 25
 - sacrovertébrale, 25
 Assise (rachis en position -), 27
 Assise (position) et éjection, 88
 Atlas
 - aspect normal, 15
 - fractures de l'-, 206

Atterrissage pilote éjecté, 79, 96
 Atterrissage (dynamique de l'-), 103
 Attitude scoliotique, 266
 Autocolmatage du disque intervertébral, 39
 Autorotation, 69
 Avions légers de tourisme (crashes des -), 60
 Avions de transport (crashes des -), 61
 Axis
 - aspect normal, 15
 - fractures de l'-, 199, 206

B

Biomécanique
 - de la colonne vertébrale, 43
 - fonctionnelle du disque, 39
 - fonctionnelle des ligaments, 40
 - de la vertèbre, 40
 Blocs congénitaux, 276
 - de la maladie de Scheuermann, 275

C

Cage thoracique et rachis, 45
 Causes d'inaptitude des pilotes (rachis), 278
 Centrifugeuses et rachis (accidents), 132
 Charnière lombosacrée
 (anomalies transitionnelles de la-), 275, 280
 Choc
 - à l'atterrissage, 108
 - à l'ouverture du parachute, 96, 108
 Chute libre, 101
 Chute libre (impacts de la -), 121
 Cisaillement (résistance au -) du disque intervertébral, 33
 Clichés d'ensemble du rachis, 265
 Coccyx, 15
 Coin antérieur, 178
 Colonne cervicale
 - des pilotes d'avions de combat, 260
 - entorses, 189, 208
 - fractures, 185, 196
 - fractures-luxations, 196
 - luxations, 186, 208
 - subluxations, 208
 - traumatismes mineurs, 189, 207
 Colonne dorsale
 - fractures, 61, 69, 87
 Colonne lombaire
 - fractures, 61, 69, 87
 Commande basse, 77
 haute, 77
 Compression discale, 31, 39
 Configurations anormales de l'avion et éjection, 82
 Corps vertébral, 11, 153, 160
 Coussin et transmission des accélérations, 90, 135
 Crash, 59, 69
 - avions légers de tourisme, 60
 - avions de transport, 61
 - fractures du rachis dans les - des hélicoptères, 71
 - des planeurs, 61
 - lésions associées aux fractures du rachis dans les -, 65
 Cyphose dorsale, 268

D

- Déhiscence de l'apophyse épineuse, 275
- Désencastrement, 276
- Déverrouillage du siège, 131
- Disques intervertébraux
 - autocollantage des -, 39
 - biomécanique des -, 31
 - cisaillement (résistance au -), 33, 39
 - compression, 31, 39
 - flexion (caractéristiques de -), 33, 39
 - fluage, 33
 - hystérésis, 33
 - pression, 39
 - relaxation, 33
 - résistance à la fatigue, 33
 - tension, 33
 - torsion (réponse à la -), 33

- Douleurs vertébrales des pilotes d'hélicoptères
 - circonstances d'apparition, 226
 - clinique, 225
 - évolution, 228
 - fréquence, 225
 - physiopathogénie, 229
 - radiologie, 227

E

- Ejection
 - atterrissage du pilote après -, 79
 - différentes phases de l'-, 77
 - différents types d'-, 82
 - en configurations anormales, 90
 - mise à feu de l'-, 79
 - préparation à l'-, 77
 - résultats globaux, 83
- Ejection à travers verrière, 93
- Ejections multiples, 298
- Encoches nucléaires, 272
- Ensemble siège-pilote (théorie mécanique de l' -), 93
- Entorse cervicale, 189, 208
- Etude radiologique dynamique, 143
- Examen clinique du rachis
 - normal; 136
 - du traumatisé, 137
- Examen radiologique du rachis
 - but, 264
 - technique, 265
- Extraction, 83

F

- Facettes articulaires, 45
- Facteur postural du pilote d'hélicoptère, 229
- Flèche de lordose, 268
- Flexion (caractéristiques de -) des disques intervertébraux, 33
- Flexion et fractures du rachis, 57
- Fluage discal, 33
- Fractures comminutives du rachis, 160, 185, 196, 286
- Fractures du rachis
 - aptitude personnel navigant et -, 286
 - classification des -, 170
 - clinique des -, 137
 - dans les crashes avions, 60, 64
 - dans les crashes hélicoptères, 69, 71
 - dans les crashes planeurs, 61
 - diagnostic différentiel, 174
 - dans l'éjection, 84
 - en vol, 127
 - étude radiologique, 174
 - instabilité, 143, 185, 286
 - dans le parachutisme, 106
 - dans les pompes, 127
 - sémiologie radiologique, 143
 - séquelles des -, 210
 - stabilité, 174
 - technique d'examen radiologique, 140

- théories pathogéniques, 57
- visites révisionnelles et -, 286
- Fractures du rachis
 - de l'arc postérieur, 153, 161
 - des apophyses articulaires, 168
 - des apophyses épineuses, 161, 185
 - des isthmes, 168
 - des lames, 168
 - du pédicule, 168
 - des transverses, 61, 168, 185, 196
- Fractures du rachis cervical, 185, 196
- Fractures-luxations du rachis, 196
- Fracture sagittale du rachis, 160

H

- Harnais du parachutiste, 101
- Hélicoptère
 - accidents d'-, 66
 - crashes d'-, 69, 71
 - douleurs vertébrales des pilotes d'-, 225
 - mesure des vibrations, 245
 - pilotage d'-, 229
 - vibrations de l'-, 234
- Hernie discale et aptitude, 298
- Hyperextension et fractures du rachis cervical, 59
- Hystérésis discal, 33

I

- Impacts en chute libre, 121
 - sur l'eau, 124
 - sur la neige, 125
 - à vitesse terminale, 125
- Inclinaison sur l'horizontale de la plateforme sacrée, 268
- Indice de renversement, 268
- Instabilité vertébrale, 143, 185
- Interventions chirurgicales sur le rachis et aptitude, 293, 298
- Isolément du pilote d'hélicoptère, 251

L

- Lame, 11
- Laminectomie, 298
- Lésions associées aux fractures du rachis
 - du crash, 64
 - de l'éjection, 88
 - du parachutisme, 110
- Lésions ligamentaires dans les fractures du rachis, 170
- Ligament
 - interépineux, 21
 - jaune, 21
 - sur-épineux, 25
 - sus-épineux, 25
 - sacrovertébral, 25
 - vertébral commun, 21
- Ligaments vertébraux
 - biomécanique fonctionnelle, 40
 - lésions traumatiques, 170
- Limites de tolérance aux impacts en chute libre, 121
- Localisation des fractures du rachis
 - crashes avions, 60, 64
 - crashes hélicoptères, 69, 71
 - crashes planeurs, 61
 - éjection, 84
 - parachutisme, 106
- Lombalgie des pilotes d'hélicoptères, 226
- Lordose cervicale, 268
 - lombaire, 268
- Luxation colonne cervicale, 186, 206

M

Maladie de Scheuermann, 271
 Malformations congénitales du rachis, 275
 Mécanisme physiopathologique des fractures du rachis
 - après crash, 64
 - après éjection, 84
 - en vol, 127
 Microtraumatismes, 48
 Mur de résistance, 145

N

Nucleus pulposus, 21

O

Ostéoarthrites vertébrales, 287
 Ouverture du parachute, 101

P

Panradiographie du rachis, 265
 Parachutes, 104
 Parachutisme, 98
 - fractures, 106
 - moyens de transport, 101
 - séquelles traumatiques, 110
 - sportif, 111
 Paradiscal defect, 178
 Phénomènes vibratoires rapides et
 - fractures du rachis, 127
 - hernies discales, 129
 Pilotes d'avions de combat et colonne cervicale, 260
 Planeurs (crashs des -), 61
 Plateaux vertébraux (rupture des -), 43
 Pompages, 127
 Précision d'atterrissage, 119
 Pression intradiscale, 39
 Protection contre les vibrations, 248

R

Rachis
 - accidents de centrifugeuse et -, 132
 - admission au personnel navigant et -, 264
 - anatomie vertébrale du -, 9
 - anomalies congénitales, 275
 - arthrose, 288, 300
 - assise (position), 27
 - biomécanique, 93
 - clichés d'ensemble du -, 265
 et cage thoracique, 45
 - embryologie, 11
 - entorses, 189, 208
 - examen clinique, 136
 - examen radiologique, 139, 264
 - facteurs d'agression en vol, 47
 - fractures du -, 60, 61, 69, 71, 84
 106, 127, 174
 - fractures-luxations, 189, 196
 - luxations, 186, 196, 208
 - maladie de Scheuermann, 271
 - normalité, 266
 - statique, 25
 - troubles statiques, 266, 268
 Radiculalgie cervicobrachiale, 289
 Radiographies sur siège, 228
 Radiographies post-mortem, 305
 Relaxation discale, 33
 Répétition des éjections, 298
 Résistance à la fatigue du disque inter-vertébral, 33
 Résistance vertébrale, 40
 Rigidité vertébrale, 43

Rotation axiale vertébrale, 45
 Rotor en vol
 - stationnaire, 234
 - de translation, 237
 Rupture de l'arc neural, 43
 - du ligament, 40
 - des plateaux vertébraux, 43

S

Sacrum, 15
 Saut en parachute, 99
 Scoliose, 266
 Segment rachidien critique, 278
 Séméiologie radiologique des fractures du rachis, 143
 Séquelles d'épiphysose vertébrale, 99, 271
 - de fractures vertébrales, 209, 213
 - traumatiques du parachutisme, 110
 Siège (déverrouillage du -), 131
 Siège éjectable, 74, 79
 Siège hélicoptère, 251
 Souplesse vertébrale, 43
 Spondylarthrite ankylosante,
 Spondylolisthésis, 276, 298
 Spondylolyse, 276
 Stabilité vertébrale, 143, 185
 Statique rachidienne, 25
 Syndrome céphalique, 64
 - cervical traumatique, 212
 - genou-hanche, 64
 de Kummel-Verneuil, 213
 - du pare-brise, 64
 - du tableau de bord, 64
 - du volant, 64
 - thoracique, 64

T

Tassement cunéiforme antérieur, 153
 Tear drop, 189
 Tension discale, 33
 Théorie mécanique de l'ensemble siège-pilote, 93
 Torsion (réponse à la -) des disques inter-vertébraux, 33
 Traction discale, 39
 Transmission des accélérations et coussin, 90
 Traumatismes et arthrose, 300
 Traumatismes et rhumatismes inflammatoires, 302
 Traumatisme et spondylolisthésis, 302
 Troubles de la statique, 266, 268
 Turbulences et fractures du rachis, 131

V

Vertèbre
 - anatomie de la -, 11
 - biomécanique de la-, 40
 - caractères généraux de la -, 11
 - résistance de la -, 40
 Vertèbre cunéiforme, 178
 Vibrations, 51
 Vibrations hélicoptère, 234, 245
 Vibratoire (évaluation du niveau -), 242
 Virage serré et éjection, 82
 Visites révisionnelles, 286
 Vol libre, 121
 Vol relatif, 116
 Voilure planante, 112
 à tuyères, 112

REPORT DOCUMENTATION PAGE

1. Recipient's Reference	2. Originator's Reference	3. Further Reference	4. Security Classification of Document												
	AGARD-AG-250 (FR)	ISBN 92-835-2108-0	SANS CLASSIFICATION												
5. Originator	Groupe Consultatif pour la Recherche et le Developpement Aérospatial Organisation du Traite de l'Atlantique Nord 7 rue Ancelle, 92200 Neuilly sur Seine, France														
6. Title	PHYSIOPATHOLOGIE ET PATHOLOGIE DES AFFECTIONS DU RACHIS EN MEDECINE AEROSPATIALE (2ème Edition)														
7. Presented at															
8. Author(s)/Editor(s)	Divers		9. Date Avril 1981												
10. Author's/Editor's Address	Divers		11. Pages 336												
12. Distribution Statement	Le présent document est diffusé conformément aux politiques et règlements de l'AGARD exposés sur le verso de la dernière feuille de couverture de toutes les publications AGARD.														
13. Keywords/Descriptors	<table> <tr> <td>Vertebrae</td> <td>Prognosis</td> </tr> <tr> <td>Pilots (personnel)</td> <td>Aerospace medicine</td> </tr> <tr> <td>Injuries</td> <td>Rotary wing aircraft</td> </tr> <tr> <td>Damage</td> <td>Airplanes</td> </tr> <tr> <td>Etiology</td> <td>Gliders</td> </tr> <tr> <td>Diagnosis</td> <td>Parachute descent</td> </tr> </table>			Vertebrae	Prognosis	Pilots (personnel)	Aerospace medicine	Injuries	Rotary wing aircraft	Damage	Airplanes	Etiology	Gliders	Diagnosis	Parachute descent
Vertebrae	Prognosis														
Pilots (personnel)	Aerospace medicine														
Injuries	Rotary wing aircraft														
Damage	Airplanes														
Etiology	Gliders														
Diagnosis	Parachute descent														
14. Abstract	<p>L'ensemble des connaissances physiologiques et médicales concernant les affections du rachis a beaucoup évolué depuis 1970, date de l'édition de l'AGARDographie No.140 consacrée aux mêmes problèmes.</p> <p>Cette AGARDographie présente le point de vue actuel d'un groupe de spécialistes dans le domaine de l'aetiologie, les diagnostics et les pronostics des lésions de la colonne vertébrale entraînées par le pilotage des aéronefs à voilure tournante, des avions conventionnels, des planeurs, ou par la pratique du parachutisme.</p> <p>La publication de ce nouvel ouvrage sera indispensable pour faciliter le travail médical du "flight surgeon" et pour informer également tous ceux qui s'intéressent à la fois à la surveillance médicophysologique du personnel navigant et à la sécurité des vols.</p> <p>Cet ouvrage est publié sous l'égide du Groupe de Médecine Aérospatiale de l'AGARD.</p>														

<p>AGARDographie No. 250 (FR) Groupe Consultatif pour la Recherche et le Développement Aérospatial, OTAN PHYSIOPATHOLOGIE ET PATHOLOGIE DES AFFECTIONS DU RACHIS EN MEDECINE AEROSPATIALE (2ème Edition) Publié en Avril 1981 336 pages</p> <p>L'ensemble des connaissances physiologiques et médicales concernant les affections du rachis a beaucoup évolué depuis 1970, date de l'édition de l'AGARDographie No. 140 consacrée aux mêmes problèmes.</p> <p>Cette AGARDographie présente le point de vue actuel d'un groupe de spécialistes dans le domaine de T.S.V.P.</p>	<p>AGARD-AG-250 (FR)</p> <p>Vertebrae Pilots (personnel) Injuries Damage Etiology Diagnosis Prognosis Aerospace medicine Rotary wing aircraft Airplanes Gliders Parachute descent</p>	<p>AGARDographie No. 250 (FR) Groupe Consultatif pour la Recherche et le Développement Aérospatial, OTAN PHYSIOPATHOLOGIE ET PATHOLOGIE DES AFFECTIONS DU RACHIS EN MEDECINE AEROSPATIALE (2ème Edition) Publié en Avril 1981 336 pages</p> <p>L'ensemble des connaissances physiologiques et médicales concernant les affections du rachis a beaucoup évolué depuis 1970, date de l'édition de l'AGARDographie No. 140 consacrée aux mêmes problèmes.</p> <p>Cette AGARDographie présente le point de vue actuel d'un groupe de spécialistes dans le domaine de T.S.V.P.</p>	<p>AGARD-AG-250 (FR)</p> <p>Vertebrae Pilots (personnel) Injuries Damage Etiology Diagnosis Prognosis Aerospace medicine Rotary wing aircraft Airplanes Gliders Parachute descent</p>
<p>AGARDographie No. 250 (FR) Groupe Consultatif pour la Recherche et le Développement Aérospatial, OTAN PHYSIOPATHOLOGIE ET PATHOLOGIE DES AFFECTIONS DU RACHIS EN MEDECINE AEROSPATIALE (2ème Edition) Publié en Avril 1981 336 pages</p> <p>L'ensemble des connaissances physiologiques et médicales concernant les affections du rachis a beaucoup évolué depuis 1970, date de l'édition de l'AGARDographie No. 140 consacrée aux mêmes problèmes.</p> <p>Cette AGARDographie présente le point de vue actuel d'un groupe de spécialistes dans le domaine de T.S.V.P.</p>	<p>AGARD-AG-250 (FR)</p> <p>Vertebrae Pilots (personnel) Injuries Damage Etiology Diagnosis Prognosis Aerospace medicine Rotary wing aircraft Airplanes Gliders Parachute descent</p>	<p>AGARDographie No. 250 (FR) Groupe Consultatif pour la Recherche et le Développement Aérospatial, OTAN PHYSIOPATHOLOGIE ET PATHOLOGIE DES AFFECTIONS DU RACHIS EN MEDECINE AEROSPATIALE (2ème Edition) Publié en Avril 1981 336 pages</p> <p>L'ensemble des connaissances physiologiques et médicales concernant les affections du rachis a beaucoup évolué depuis 1970, date de l'édition de l'AGARDographie No. 140 consacrée aux mêmes problèmes.</p> <p>Cette AGARDographie présente le point de vue actuel d'un groupe de spécialistes dans le domaine de T.S.V.P.</p>	<p>AGARD-AG-250 (FR)</p> <p>Vertebrae Pilots (personnel) Injuries Damage Etiology Diagnosis Prognosis Aerospace medicine Rotary wing aircraft Airplanes Gliders Parachute descent</p>

<p>l'aetiology, les diagnostics et les pronostics des lésions de la colonne vertébrale entrainées par le pilotage des aéronefs à voilure tournante, des avions conventionnels, des planeurs, ou par la pratique du parachutisme.</p> <p>La publication de ce nouvel ouvrage sera indispensable pour faciliter le travail médical du "flight surgeon" et pour informer également tous ceux qui s'intéressent à la fois à la surveillance médocophysiological du personnel navigant et à la sécurité des vols.</p> <p>Cet ouvrage est publié sous l'égide du Groupe de Médecine Aérospatiale de l'AGARD.</p> <p>ISBN 92-835-2108-0</p>	<p>l'aetiology, les diagnostics et les pronostics des lésions de la colonne vertébrale entrainées par le pilotage des aéronefs à voilure tournante, des avions conventionnels, des planeurs, ou par la pratique du parachutisme.</p> <p>La publication de ce nouvel ouvrage sera indispensable pour faciliter le travail médical du "flight surgeon" et pour informer également tous ceux qui s'intéressent à la fois à la surveillance médocophysiological du personnel navigant et à la sécurité des vols.</p> <p>Cet ouvrage est publié sous l'égide du Groupe de Médecine Aérospatiale de l'AGARD.</p> <p>ISBN 92-835-2108-0</p>
<p>l'aetiology, les diagnostics et les pronostics des lésions de la colonne vertébrale entrainées par le pilotage des aéronefs à voilure tournante, des avions conventionnels, des planeurs, ou par la pratique du parachutisme.</p> <p>La publication de ce nouvel ouvrage sera indispensable pour faciliter le travail médical du "flight surgeon" et pour informer également tous ceux qui s'intéressent à la fois à la surveillance médocophysiological du personnel navigant et à la sécurité des vols.</p> <p>Cet ouvrage est publié sous l'égide du Groupe de Médecine Aérospatiale de l'AGARD.</p> <p>ISBN 92-835-2108-0</p>	<p>l'aetiology, les diagnostics et les pronostics des lésions de la colonne vertébrale entrainées par le pilotage des aéronefs à voilure tournante, des avions conventionnels, des planeurs, ou par la pratique du parachutisme.</p> <p>La publication de ce nouvel ouvrage sera indispensable pour faciliter le travail médical du "flight surgeon" et pour informer également tous ceux qui s'intéressent à la fois à la surveillance médocophysiological du personnel navigant et à la sécurité des vols.</p> <p>Cet ouvrage est publié sous l'égide du Groupe de Médecine Aérospatiale de l'AGARD.</p> <p>ISBN 92-835-2108-0</p>

